Aus der Abteilung für Sportmedizin
Ärztl. Direktor: Professor Dr. D. Jeschke
des Zentrums Innere Medizin der Universität Tübingen

Die psychophysische Belastung beim Fliegen: Kardiopulmonale Regulation und Energieumsatz bei Segelflug - Piloten

Inaugural - Dissertation
zur Erlangung des Doktorgrades der Medizin

der
MEDIZINISCHEN FAKULTÄT
(Klinische Medizin)
der Eberhard - Karls - Universität
Tübingen

vorgelegt von
Johannes Beier
aus Netzschkau
1982

Aus der Abteilung für Sportmedizin
Ärztl. Direktor: Professor Dr. D. Jeschke
des Zentrums Innere Medizin der Universität Tübingen

Die psychophysische Belastung beim Fliegen: Kardiopulmonale Regulation und Energieumsatz bei Segelflug - Piloten

Inaugural - Dissertation
zur Erlangung des Doktorgrades der Medizin

der
MEDIZINISCHEN FAKULTÄT
(Klinische Medizin)
der Eberhard - Karls - Universität
Tübingen

vorgelegt von
Johannes Beier
aus Netzschkau
1982

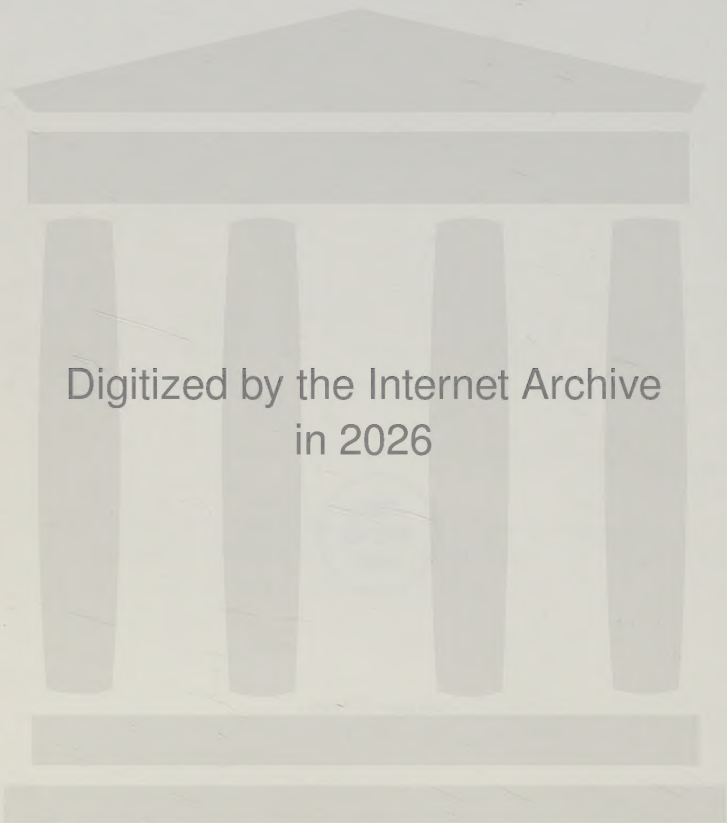
UNIV.
LEIDEN
BIBL.

Dekan: Professor Dr. K. Voigt

1. Berichterstatter: Professor Dr. D. Jeschke

2. Berichterstatter: Professor Dr. E. Betz

Meinen Eltern


Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41536519_0008

INHALTSÜBERSICHT

	Seite
1. EINLEITUNG UND FRAGESTELLUNG	1
2. VORBEMERKUNGEN ZUM SEGELFLUG	2
2.1 Technik des Segelfluges	2
2.1.1 Windenstart	2
2.1.2 Flugzeugschleppstart	2
2.1.3 Flug	2
2.1.4 Landung	3
2.2 Psychophysische Belastungen des Segelflug-Piloten	4
2.2.1 Psychische Belastungen	4
2.2.1.1 Emotionale Belastungen	4
2.2.1.2 Mentale Belastungen	4
2.2.2 Physische Belastungen	4
2.3 Physiologische Vorbemerkungen	5
3. METHODE	7
3.1 Untersuchungsgang beim Feldversuch	7
3.1.1 Feststellung der körperlichen Arbeit beim Segelfliegen	7
3.1.2 Fliegerischer Untersuchungsplan	7
3.1.3 Untersuchte physiologische Meßgrößen und Meßwertaufnahme	8
3.1.4 Datenübermittlung und Registrierung	10
3.2 Überprüfung des OXYCON P für die vorliegenden Versuchsbedingungen	10
3.2.1 Sauerstoffmeßzelle	10
3.2.2 Volumenmessung	11
3.3 Auswertung der registrierten Meßdaten	14
3.4 Spiroergometrischer Untersuchungsgang (Laborversuch)	16
3.5 Probandengut	17
3.6 Statistische Behandlung der Daten	19
4. ERGEBNISSE	20
4.1 Spiroergometrische Untersuchung (Laborversuch)	20
4.2 Untersuchung beim Fliegen (Feldversuch)	23
4.2.1 Feststellung der körperlichen Arbeit beim Segelfliegen	23
4.2.2 Das Verhalten kardiopulmonaler Parameter bei unterschiedlicher Startart	24

Seite

4.2.2.1 Windenstart 24
4.2.2.2 Flugzeugschleppstart 27
4.2.2.3 Kalorischer Umsatz 27
4.2.3 Der Einfluß der kardiozirkulatorischen Leistungsfähigkeit auf das Verhalten kardiopulmonaler Parameter beim Segelflug 35
4.2.4 Der Einfluß der Flugerfahrung auf das Verhalten kardiopulmonaler Parameter beim Segelflug 47
5. DISKUSSION 60
5.1 Diskussion der Methode 60
5.1.1 Probanden 60
5.1.2 Flugprotokoll 60
5.1.3 Störgrößen im Feldversuch 61
5.1.4 Meßwertaufnahme und Datengewinnung 61
5.1.5 Sensitivität der Parameter 62
5.1.6 Meßtechnische Hinweise 63
5.2 Die kardiopulmonale Regulation während des Segelfluges 64
5.3 Allgemeine und flugbezogene Interpretation der Ergebnisse 71
5.4 Sportmedizinische Gesichtspunkte 79
5.4.1 Der Einfluß der kardiozirkulatorischen Leistungsfähigkeit auf die Streßreaktion beim Segelflug 79
5.4.2 Der Einfluß der Flugerfahrung auf die Streßreaktion beim Segelflug 80
5.5 Flugmedizinische Gesichtspunkte 82
5.5.1 Kardiale Belastung 83
5.5.2 Hyperventilation 84
6. ZUSAMMENFASSUNG 85
7. LITERATURVERZEICHNIS 87
8. TABELLARISCHER ANHANG 98

1. EINLEITUNG UND FRAGESTELLUNG

Das Segelfliegen ist einerseits eine Sportart mit den Möglichkeiten, einer breiten Basis einen Freizeitsport und einer Leistungsspitze Wettbewerbs- und Rekordbedingungen zu bieten, andererseits, mit ca. 40 000 Piloten allein in der Bundesrepublik Deutschland (38), wesentlicher Bestand des öffentlichen Luftverkehrs.
Flugmedizinische und sportmedizinische Fragestellungen treten umso mehr in den Vordergrund, je weiter der technologische Fortschritt im Flugzeugbau die Grenzen des fliegerisch Möglichen hinausschiebt und je deutlicher dadurch der Pilot als eine leistungslimitierende Größe im Mensch-Maschine-System erkennbar wird (106,111, 112,113). Für die spezifischen Bedingungen des Segelfluges liegen bisher kaum Daten über die Belastungen und Beanspruchungen des Piloten vor. Die wenigen Arbeiten, die sich mit dem Herzfrequenz-Verhalten während des Segelfluges beschäftigen (16,20,21,22,35), erlauben keine Differenzierung der Belastung des Piloten ("pilot workload") in psychische und physische Komponenten. Hierfür ist es notwendig, weitere physiologische Parameter simultan zu erfassen, die von psychischen Faktoren weitgehend unabhängig sind. Als eine geeignete Funktionsgröße bietet sich die Sauerstoffaufnahme an, die bei langdauernder Belastung allein vom muskulären Energiebedarf bestimmt wird.
Ziel der vorliegenden Untersuchung war es, neben kardialen auch respiratorische Parameter von Piloten während des Segelfluges zu verfolgen. Dabei sollten im einzelnen folgende Fragen Beantwortung finden:

a) Welche qualitativen und quantitativen Veränderungen kardiopulmonaler Parameter ruft die Aufgabenstellung Segelflug bei den Piloten hervor?
b) Lassen sich anhand der kardiopulmonalen Parameter qualitativ Unterschiede in der psychophysischen Belastung bei Flugzeugschleppstart gegenüber Windenstart erkennen?
c) Hat der kardiozirkulatorische Leistungszustand einen Einfluß auf die Reaktionen kardiopulmonaler Parameter beim Segelflug?
d) Welchen Einfluß hat die Flugerfahrung auf die Streßreaktion beim Segelfliegen?

In einer Untersuchung an 29 Segelflugpiloten wurden unter Zuhilfenahme tragbarer Meßwertaufnehmer die Veränderungen kardiopulmonaler Parameter bei Segelflügen im flugplatznahen Bereich verfolgt. Im Vordergrund stand die Beobachtung der Start- und Lande-Phase, die als Momente der höchsten psychophysischen Belastung angenommen wurden. Außerdem erfolgte in engem zeitlichen Zusammenhang eine spiroergometrische Leistungsdiagnostik aller Piloten im Labor.

2. VORBEMERKUNGEN ZUM SEGELFLUG

2.1 Technik des Segelfluges (Abb. 1)

Segelflug bedeutet Gleitflug. Das nicht eigenstartfähige Segelflugzeug wird entweder durch Windenstart oder im Schlepp hinter einem Motorflugzeug auf Flughöhe gebracht. Im freien Flug wird das Eigengewicht des Flugzeuges in kinetische Energie umgesetzt, die aufgrund geeigneter Tragflächen-Profile und der Flügel-Spannweite dem Flugzeug Gleiteigenschaften verleiht (11).

2.1.1 Windenstart (W)

Mit Hilfe einer motorgetriebenen Seilwinde wird das Segelflugzeug auf eine Flughöhe von ca. 300 m über Grund (ü.G.) und auf eine sichere Fluggeschwindigkeit von ca. 80 km/h geschleppt. Nach dem Abheben vom Boden wird eine Steigfluglage von 45^{o} bis 60^{o} eingenommen. Kurz vor dem Erreichen der Schlepphöhe wird der Steigwinkel bis zum Horizontalflug abgeflacht. Das Ausklinken des Schleppseiles erfolgt manuell oder automatisch. Der Pilot hat während der Startphase durch entsprechende Ruderführung Richtung und sichere Geschwindigkeit einzuhalten. Die Dauer eines Windenstarts vom Anrollen bis zum Ausklinken des Schleppseiles beträgt ca. 40 Sekunden.

2.1.2 Flugzeugschleppstart (F)

Hinter einem ausreichend starken einmotorigen Sportflugzeug wird das Segelflugzeug innerhalb von etwa zweieinhalb Minuten auf eine Höhe von 300 m ü.G. geschleppt. Der Segelflugpilot hat während des Schlepps ständig Höhe und Richtung zum Schleppflugzeug zu halten; bodennahe Luftverwirbelungen, die Propellerböe des Motorflugzeuges und gegebenenfalls Seitenwindeinfluß erfordern besonders in der frühen Start-Phase reaktionsschnelle, richtige Ruderführung. Der Flugzeugschlepp wird üblicherweise bei Erreichen einer Aufwindzone durch manuelles Ausklinken des Schleppseiles beendet.

2.1.3 Flug

Der Segelflug nutzt die meteorologischen Gegebenheiten, daß bodennahe Luft, nachdem sie durch Sonneneinstrahlung erwärmt worden ist, als Luftmasse umschriebener Größe nach oben steigt (Aufwind). Durch gesteuerten Gleitflug (Kreisen) innerhalb der aufsteigenden Luft kann mit dem Segelflugzeug Höhe gewonnen werden, wenn die Vertikalgeschwindigkeit der umgebenden Luft größer ist als des Eigensinken des Flugzeuges. Unter idealen meteorologischen Bedingun-

gen sind so Flugzeiten bis zu 10 Stunden möglich, die für Streckenflüge über viele hundert Kilometer genutzt werden können. Streckenflug beruht auf Höhengewinn in Aufwindzonen und Streckengewinn im Gleitflug zwischen Aufwindzonen (92,117).

2.1.4 Landung

Die Landeeinteilung erfolgt von der "Position" aus, einem gedachten Punkt querab vom Aufsetzpunkt. Die Flughöhe soll an der "Position" 150 m ü.G. nicht unterschreiten. Der Landeanflug wird über Gegen- und Queranflug fortgesetzt. Im Endanflug werden mit Hilfe von Bremsklappen Sinkrate und Anfluggeschwindigkeit bis zum Aufsetzen auf der Landebahn reguliert.

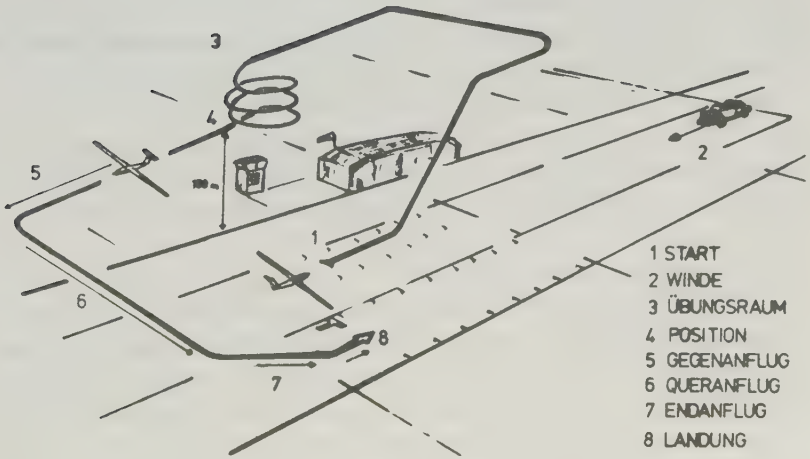


Abb. 1 Schematische Darstellung einer schulmäßigen Platzrunde beim Segelfliegen

2.2 Psychophysische Belastungen des Segelflug-Piloten

Der Begriff "psychophysische Belastung", in der englischsprachigen Literatur als "workload" bezeichnet, umfaßt nach GARTNER (40):

a) die Summe der von außen angetragenen Aufgabenanforderungen (task demands),

b) die Anstrengung, den Aufgabenanforderungen gerecht zu werden, verknüpft mit Konzentration, Umsicht, Bereitschaft, Motivation, Erfahrung und anderen persönlichkeitsgebundenen Merkmalen,

c) die Ausführung einer Tätigkeit, die als körperliche Beanspruchung erfaßbar oder als Leistung meßbar ist.

2.2.1 Psychische Belastungen

Die psychischen Belastungen setzen sich aus emotionalen und mentalen Belastungsfaktoren zusammen.

2.2.1.1 Emotionale Belastungen

Fliegen setzt voraus, daß gewisse aerodynamische Gesetzmäßigkeiten respektiert werden; die Nichtbeachtung dieser Gesetze bedeutet ein unmittelbares, z.T. lebensbedrohendes Unfallrisiko. Das Risikoerlebnis liegt im Wissen um die Gefährdung. Die Furcht ist ohne Zweifel im Unterbewußtsein eines jeden Piloten allgegenwärtig (98). Als kritische Situationen gelten für den Segelflug, wie allgemein in der Luftfahrt, die Start- und die Lande-Phase (65,71).

2.2.1.2 Mentale Belastungen

Die sichere Bedienung des Flugzeuges bei Start, Flug und Landung ist Gegenstand intensiver fliegerischer Ausbildung. Die eingentliche Fähigkeit zum "Segelfliegen", d.h. die gegebenen meteorologischen Bedingungen zu erkennen und fliegerisch zu nutzen, ergeben sich erst durch den überlegten Einsatz theoretischer Kenntnisse und durch fliegerische Erfahrung. Die Aufmerksamkeit für den Flugzustand, die Überwachung der Instrumente, die Luftraumbeobachtung, navigatorische Aufgaben und die Entscheidungsnotwendigkeiten in der Flugführung sind wesentliche Bestandteile der mentalen Belastung (32,111).

2.2.2 Physische Belastungen

Im Gegensatz zu Piloten anderer Luftfahrzeugklassen sucht der Segelflieger die vertikalen, z.T. stark turbulenten Luftbewegungen, die ihm den Höhengewinn

liefern. Beim ständigen Kreisen im Aufwind addieren sich horizontale und vertikale Winkelgeschwindigkeiten bzw. -beschleunigungen, deren Einflüsse auf Sensomotorik und Kreislaufsystem bisher nicht erforscht worden sind. Temperatureinflüsse, stundenlange Immobilisation, Änderung der Tagesgewohnheiten und des Ernährungsverhaltens sind zusätzliche, nicht zu unterschätzende Faktoren. Auch die erheblichen körperlichen Anstrengungen beim Aufrüsten und Bewegen der Flugzeuge am Boden sind zu erwähnen.

2.3 Physiologische Vorbemerkungen

Die psychophysischen Belastungen von Piloten wurden bisher mit drei unterschiedlichen Verfahren untersucht:

1) Messungen von Leistungsdaten mit psychologischen Testmethoden (6,13,39,-62,69,100,110).

2) Pilotenbefragungen, die Aussagen zur subjektiv empfundenen Arbeitsschwere ermöglichten (44).

3) Messungen physiologischer Korrelate der Arbeit oder Belastung, aus denen die Beanspruchung des Piloten erschlossen werden kann (25,57,68,78,86).

Eine klassische Methode, die Belastung von Piloten während des Fluges abzuschätzen, ist die zeit- und ereignissynchrone Beobachtung der Herzfrequenz (5,10,35,58, 61,66,84,95,96,97,99,102,103). Sie wurde erstmals 1933 von v. DIRINGSHOFEN angewandt (31). Über das Verhalten der Herzfrequenz bei Segelflugpiloten liegen die Ergebnisse von BURCHARDT (16), CLASING (20,21,22) und NEUBERT (83) vor, die telemetrische Methoden einsetzten.

Die Aussagekraft der Herzfrequenz ist aber wegen der intra- und interindividuellen Streuung gering, wenn sie nicht mit anderen physiologischen Meßgrößen gekoppelt beurteilt wird (8,83,88,95). Die Atemfrequenz, isoliert oder zusätzlich zur Herzfrequenz registriert, wird von einigen Autoren (31,35,61,66,95,103) aufgrund geringer interindividuellen Streuung als empfindlicher Indikator für die psychophysischen Belastungen von Piloten eingeschätzt.

Da Herz- und Atemfrequenz aber integrale physiologische Variablen darstellen, die sowohl unter psychischer wie auch unter rein körperlicher Arbeit Veränderungen erfahren, ist die Bestimmung dieser Parameter nicht ausreichend, um psychisch und physisch bedingte Reaktionen kardiopulmonaler Parameter bei der Belastung des Fliegens zu differenzieren. Hierzu ist es notwendig, weitere physiologische Parameter körperlicher Belastungen zu untersuchen. Am geeignetsten ist die Messung der Sauerstoffaufnahme, die spirometrisch erfaßt werden kann.

Der Einsatz spirometrischer Meßmethoden bei Piloten unter echten Flugbedingungen wurde erstmals von COREY (25) beschrieben. Seine Ergebnisse zeigen, daß unter Simulator-Bedingungen (56,63) die wahren psychophysischen Belastungen des Piloten nur unvollständig reproduziert werden können. In der Folgezeit wurden von einigen wenigen Arbeitsgruppen Energieumsatz bzw. Sauerstoffaufnahme bei Berufs- und Militärflugzeugführern wie auch bei Piloten von leichten Motorflugzeugen unter Flugbedingungen gemessen (9,57,68,78). Zur Anwendung kam eine Douglassack-Technik. Dabei wurde die exspiratorische Atemluft über eine definierte Zeit gesammelt und die Zusammensetzung der Atemgase später im Labor analysiert. Eine Zuordnung von Atemvolumina und der daraus ermittelten Sauerstoffaufnahmewerten zu spezifischen fliegerischen Situationen war dadurch nur eingeschränkt möglich.

Bereits 1967 hat KISSEN (60) auf die Möglichkeit hingewiesen, mit Hilfe der polarographischen Sauerstoffmeßzelle kontinuierlich die Sauerstoffaufnahme von Piloten zu messen. Die nachfolgend im methodischen Teil beschriebene Untersuchungstechnik, mit der simultan und kontinuierlich Herzfrequenz, Atemfrequenz, Atemminutenvolumen und - unter Verwendung der polarographischen Meßzelle - die Sauerstoffaufnahme gemessen wurden, wurde unseres Wissens bisher noch von keiner Arbeitsgruppe bei Flugversuchen angewandt.

3. METHODE

Die Untersuchung bestand aus zwei Hauptelementen:

1. einer kardiopulmonalen Untersuchung während des Segelfluges (Feldversuch) und
2. einer spiroergometrischen Untersuchung mittels Fahrradergometerbelastung (Laborversuch).

3.1 Untersuchungsgang beim Feldversuch

3.1.1 Feststellung der körperlichen Arbeit beim Segelfliegen

Um die Größenordnung der statischen und dynamischen muskulären Beanspruchung bei der Steuerung des Flugzeuges festzustellen, wurden von Fluglehrern während mehrerer Flüge die Ruderkräfte mittels einer an die Steuerelemente befestigten Federwaage gemessen. Im Laborversuch wurde überprüft, welche Sauerstoffaufnahme der gleichen muskulären Beanspruchung entspricht.

3.1.2 Fliegerischer Untersuchungsplan

Die Untersuchung beim Segelflug erfolgte in doppelsitzigen Schulflugzeugen Typ "BERGFALKE II". Die Versuchsperson steuerte das Flugzeug vom vorderen Sitz aus. Der hintere Sitz wurde aus Sicherheitsgründen von einem mitfliegenden Piloten, in der Regel einem Fluglehrer, besetzt. Für die Versuchsperson war der Meßflug der erste Flug des Tages.

Im Meßablauf wurden fünf Phasen definiert:

1) Soweit möglich (die Untersuchungen fanden parallel zum normalen Vereins- und Flugschulungsbetrieb statt), wurde eine dreiminütige Vorstart-Phase eingehalten. In einzelnen Fällen war aus flugbetrieblichen Gründen die volle Dauer dieser Phase jedoch nicht möglich. Die Vorstart-Phase beinhaltete Sitzen im Flugzeug, Vorflug-Überprüfung der Freigängigkeit der Steuerelemente, Überprüfung der Instrumente, Einklinken des Schleppseiles und Anschleppen des Seiles bis zum Straffen.

2) Anrollen, Abheben Steigflug, Ausklinken des Schleppseils und Einnehmen der Normalfluglage bezeichneten die Start-Phase, die für den Windenstart eine Minute, für den Flugzeugschleppstart 2,5 Minuten betrug.

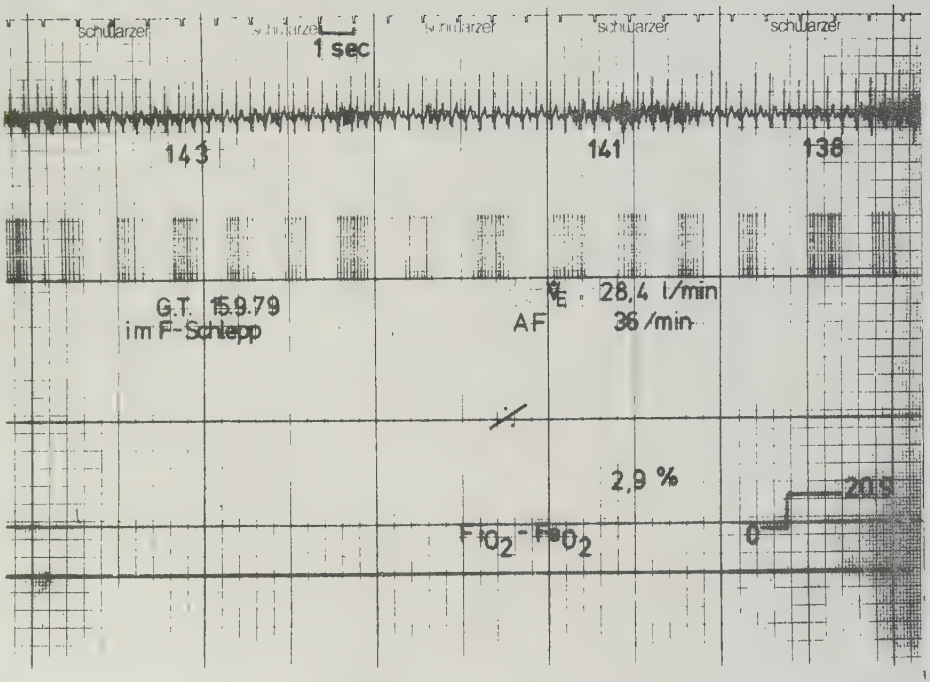
3) Die anschließende Flug-Phase wurde unabhängig von thermischen Bedingungen als reiner Gleitflug durchgeführt. Mit der verfügbaren Höhe waren Gleitflüge von etwa fünfminütiger Dauer möglich. Zur Vereinheitlichung wurden alle Flüge bis zur 3,5. Minute nach Abheben von der Startbahn ausgewertet.

4) Die Lande-Phase beinhaltete einen schulungsmäßig eingeteilten Landeanflug (siehe Abb. 1), der von der "Position" aus über Gegen-, Quer- und Endanflug zur Landung führte. Die Dauer der Lande-Phase betrug ca. 2 Minuten.
5) Nach dem Ausrollen des Flugzeuges wurde eine dreiminütige Nachflug-Phase registriert, in der der Pilot ruhig sitzend im Flugzeug verblieb. Aus Gründen der Flugsicherheit mußte in einigen Fällen das Flugzeug vorzeitig von der Landebahn entfernt werden, um andere landende Flugzeuge nicht zu gefährden.
Der Ablauf jedes Fluges wurde vom Boden aus beobachtet und durch Besprechen eines Tonbandes sowie durch Notizen protokolliert, so daß eine zeitliche Zuordnung der Meßparameter zu den Flug-Phasen exakt möglich war. Die Flughöhen wurden kontinuierlich auf einem im Flugzeug mitgeführten Barographen registriert.

3.1.3 Untersuchte physiologische Meßgrößen und Meßwertaufnahme (Geräte)
Die folgenden Meßgrößen wurden abgeleitet und registriert (Abb. 2):

a) EKG in angenähert NEHB'scher Ableitung
b) Exspiratorische Atemvolumina
c) In-/exspiratorische Sauerstoffdifferenz.

Hierfür kamen die unten beschriebenen Meßwertaufnehmer zur Anwendung, die im Flugzeug fest installiert wurden. Die Meßwertregistrierung erfolgte durch Magnetbandspeicherung nach telemetrischer Datenübermittlung.
Bei dem im Flugzeug sitzenden Probanden wurden zur Registrierung des Elektrokardiogramms drei Elektroden parasternal aufgeklebt und mit dem Telemetriesystem verbunden (Abb. 2, Kanal "EKG"). Für die Meßwertaufnahme der spirometrischen Parameter trug der Proband eine Atemmaske; die Verbindung zu dem Spirometersystem erfolgte über einen flexiblen Schlauch. Maske und Schlauchführung waren so ausgelegt, daß der Pilot in seiner Bewegungsfähigkeit ungehindert war.
Als Meßwertaufnehmer für die Atemvolumina und die Sauerstoffanalyse der Exspirationsluft kam das Gerät OXYCON P (MIJNHARDT) zur Anwendung. Diese Anlage besteht aus einem ca. 4 kg schweren tragbaren Teil als Meßwertaufnehmer und einer stationären Kontroll- und Auswerteeinheit. Im tragbaren Teil, der im Flugzeug zum Einbau kam, findet sich eine trockene Gasuhr, die pro 100ml einströmender Exspirationsluft über einen Lochblendenmechanismus einen elektrischen Impuls abgibt (Abb. 2, Kanal "$\dot{V}_E$"). Eine Gasprobe gelangt in den Gasanalyseteil. Dort werden fortlaufend die Sauerstoffkonzentrationen der Exspirationsluft in einer Meßzelle nach dem polarographischen Prinzip gemessen. Die Sauerstoffmeßzelle besteht aus einem galvanischen Element mit einer Goldkathode und einer Silberanode, umgeben von gepuffertem Kaliumchlorid-Gel



EKG

Ermittlung der Herzfrequenz (min^{-1})

EXSPIRATOR. ATEMVOLUMEN (l/min)

jeder Impuls entspricht
100 ml exspir. Volumen (ATPS)

ATEMFREQUENZ (min^{-1})

jede Impulsverdichtung entspricht einer Atemphase

IN-/EXSPIRATORISCHE SAUERSTOFFDIFFERENZ (%)

kontinuierliche Aufzeichnung des Analogsignals; die Eichung (20,9) ist zusätzlich dargestellt

ABB. 2: AUSSCHNITT AUS EINER ORIGINAL-REGISTRIERUNG DER DATEN AUF DEM PAPIERSCHREIBER

als Elektrolyt. Das galvanische Element ist durch eine für Sauerstoff permeable Membrane von der Umgebungsluft getrennt. Eine polarisierende Spannung wird zwischen den beiden Elektroden aufgebaut; freiwerdende Elektronen setzen unter Anwesenheit von Sauerstoff OH^--Ionen frei nach der Reaktionsgleichung:

$$1/2\ O_2 + H_2O + 2e^- \longrightarrow 2\ OH^-$$

Der resultierende Stromfluß ist dem Sauerstoffpartialdruck direkt proportional (Abb. 2, Kanal "F_{iO_2}-F_{eO_2}").

3.1.4. Datenübermittlung und Registrierung

Für die Übermittlung der bioelektrischen Signale von EKG und spirometrischen Meßgrößen wurde anfänglich eine Sende-Empfangsanlage BIOTEL 23 (GLONNER-ELECTRONIC) verwendet. Bestehend aus einem Kleinsender von 100 mW Ausgangsleistung und einer Empfängereinheit bot diese Anlage die Möglichkeit, auf maximal 4 Kanälen Analogsignale zu übertragen. Die vom Flugzeug aus übermittelten Signale wurden bodenseitig auf einem Bandspeichergerät STORE 4 D (RACAL-THERMIONIC) registriert.

Im weiteren Verlauf der Untersuchung wurde die Funktelemetrie ersetzt durch ein Bandspeichersystem, das eigens für den Versuch von U. BAUDERMANN (LENNARTZ-ELEKTRONIK) entwickelt wurde. Es bestand aus einem EKG-Vorverstärker, drei spannungsgesteuerten Oszillatoren, einem Quarzoszillator zur Erzeugung einer Pilotfrequenz und einer Tonband-Kassetten-Einheit. Die Wiedergabe der Signale erfolgte über Demodulatoren, wobei die mitregistrierte Pilotfrequenz Signalveränderungen durch geringe Bandlaufschwankungen kompensierte.

Die auf Magnetbändern bzw. -kassetten gespeicherten bioelektrischen Signale wurden nach Beendigung der Untersuchungen auf einem Mehrkanal-Schreiber (SCHWARZER) mit einem Papiervorschub von 10 mm/sec aufgezeichnet. Das EKG wurde direkt ausgeschrieben, die spirometrischen Signale mit Hilfe der OXYCON-Kontrolleinheit ausgewertet, digital angezeigt und analog auf dem Schreiber aufgezeichnet.

Einen Originalausschrieb zeigt Abb. 2.

3.2 Überprüfung des OXYCON P für die vorliegenden Untersuchungsbedingungen

Für die Verwendung des OXYCON P im Flugversuch waren die atmosphärisch-physikalischen Bedingungen zu berücksichtigen.

3.2.1 Sauerstoffmeßzelle

Mit zunehmender Höhe über Meeresspiegel nimmt der Luftdruck in nicht-linearer Funktion ab. Nach dem DALTON'schen Gesetz ist der Gesamtdruck eines

Gasgemisches gleich der Summe der Teildrücke der Einzelgase. Das Atemgas Sauerstoff hat im Gasgemisch "Luft" einen in allen Höhen der Troposphäre gleichbleibenden Volumenanteil von 20,9%. Daraus leitet sich ab, daß der Sauerstoffpartialdruck sich bei zunehmender Höhe in Abhängigkeit vom Gesamtdruck ändert.

Da die Sauerstoffmeßzelle des OXYCON P Sauerstoffpartialdrucke mißt, sind die Einflüsse der Höhenänderung während des Fliegens zu berücksichtigen. Deshalb wurden Eichflüge durchgeführt, bei denen die höhenabhängigen Signale der O_2-Meßzelle registriert wurden. Darüber hinaus wurde im Institut für Flugmedizin der Deutschen Forschungs- und Versuchsanstalt für Luft- und Raumfahrt (DFVLR, Bonn) Höheneichungen der O_2-Zelle in der Unterdruckkammer durchgeführt. Abbildung 3 stellt die Signaländerung der Sauerstoffmeßzelle bei Veränderung des atmosphärischen Gesamtdrucks dar. Innerhalb der Höhendifferenz von 400 m, die den Flugversuchen entspricht, zeigte sich die höhenabhängige Signaländerung in linearer Funktion (Abb. 4). Die Eichflüge und die Kammerversuche machten auch deutlich, daß die O_2-Meßzelle in der Lage ist, innerhalb einer Verzögerung von 10 sec eine Änderung des O_2-Partialdrucks anzuzeigen. Für die Auswertung der O_2-Differenz während der Flugversuche hatte dies zur Folge, daß die Daten anhand genauer Höhenangaben (Barogramm) um den Betrag korrigiert wurden, der der höhenabhängigen Signaländerung entsprach (Abb. 4).

Unabhängig von der schnellen Einstellung der Meßzelle bei Höhenänderung war eine verzögerte Antwortzeit für die Messung der in-/exspiratorischen Sauerstoffdifferenz, aufgrund der langsamen Durchmischung der Gasprobe im Meßsystem, zu beobachten. Nach eigenen Vorversuchen lag die für die gemessenen Volumina reale Einstellzeit der O_2-Meßzelle bei 1,5 Minuten, entsprechend den Angaben aus dem Herstellerwerk. Für die Berechnung der Sauerstoffaufnahme wurde diese Verzögerung berücksichtigt.

Die Sauerstoffmeßzelle wurde jeweils vor den Flügen einer Eichung nach Vorschrift unterzogen. Innerhalb der relativ kurzen Flüge waren nur geringe Abweichungen von der Eichung festzustellen. Durch Aufgabe eines Eichsignals unmittelbar vor und nach jedem Meßflug konnten diese Veränderungen erfaßt und zur Korrektur genutzt werden.

3.2.2 Volumenmessung

Auch für die Messung der Atemvolumina im Flugzeug waren die atmosphärischen Bedingungen zu berücksichtigen.

Die Atemvolumina wurden unter ATPS-Bedingungen gemessen. Um die Umrechnungen in BTPS-Bedingungen für das Atemminutenvolumen bzw. in STPD-Bedingungen

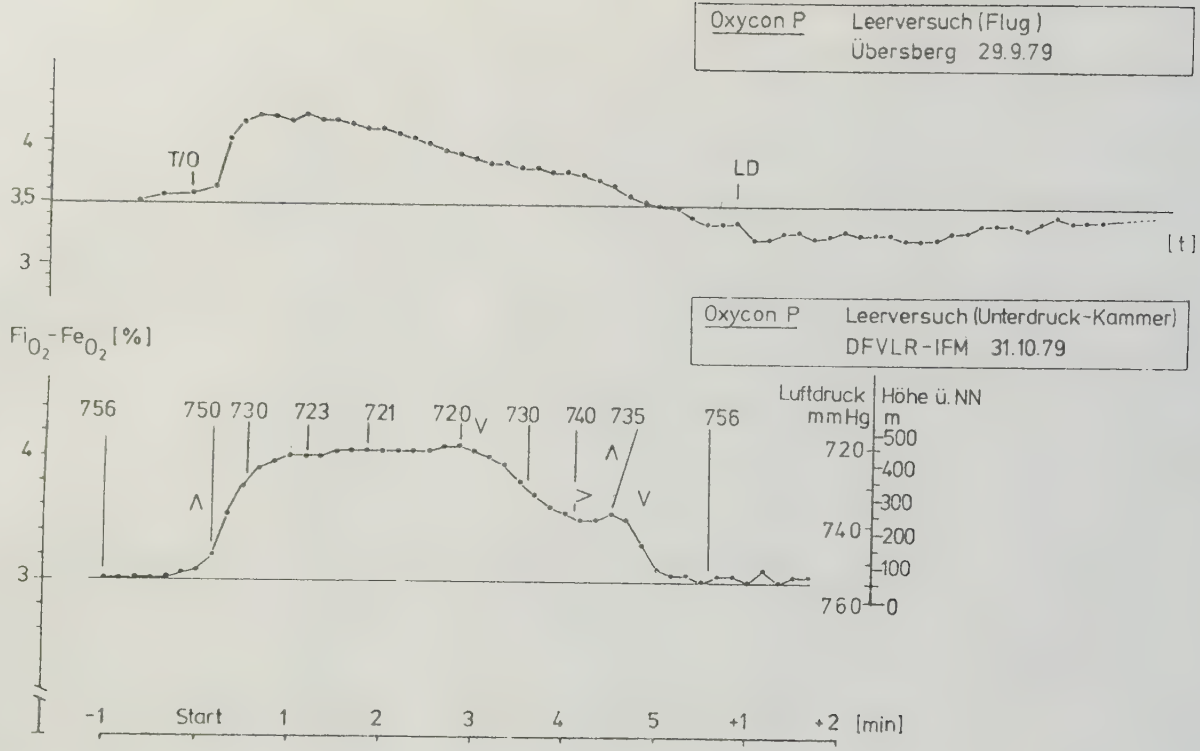


ABB.3: VERHALTEN DER POLAROGRAPHISCHEN SAUERSTOFFMESSZELLE BEIM LEERVERSUCH:
A) BEI EINEM SEGELFLUG NACH UNTERSUCHUNGSPROTOKOLL (WINDENSTART), DARGESTELLT IM OBEREN TEIL DER ABBILDUNG,
B) BEI ÄNDERUNG DES BAROMETRISCHEN DRUCKS IN DER UNTERDRUCKKAMMER (UNTERER TEIL DER ABBILDUNG.),
DIE MESSZELLE WURDE ZUVOR AUF EINEN ΔO_2-WERT VON 3,5 BZW. 3% GEEICHT.

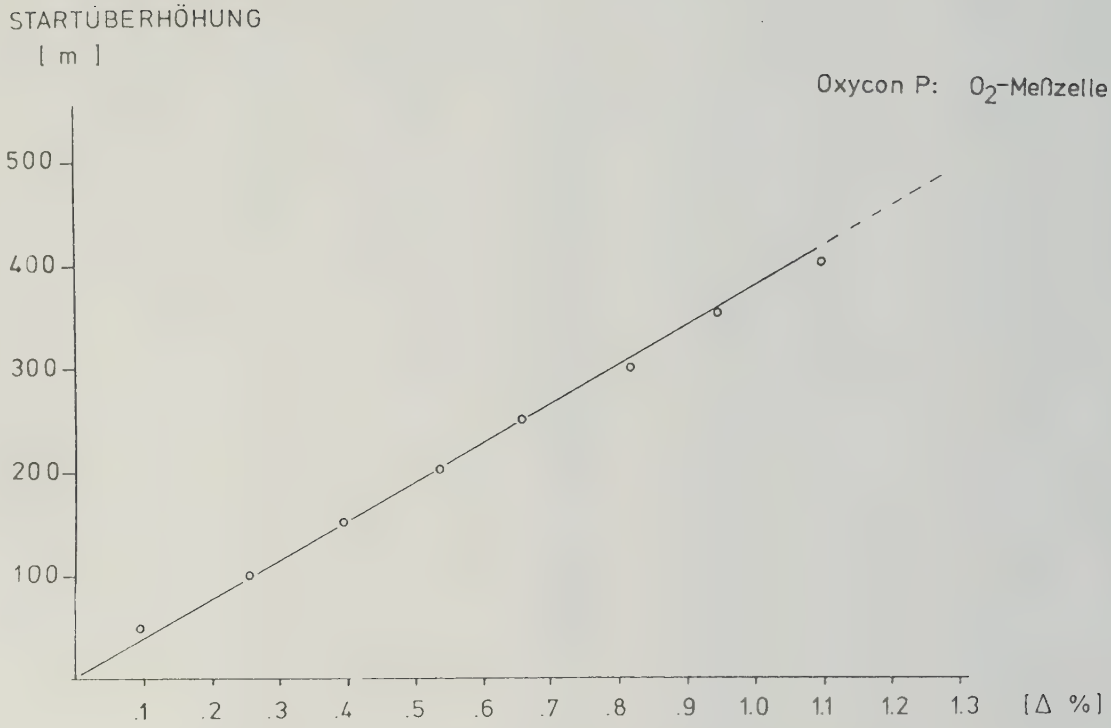


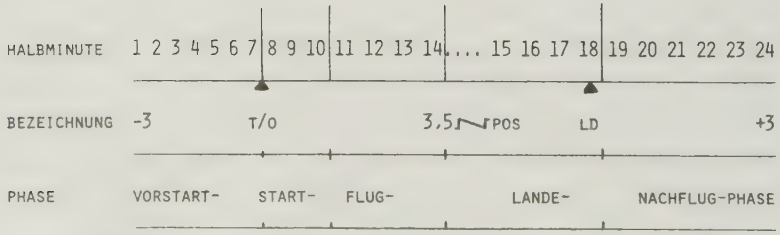
ABB. 4: POLAROGRAPHISCHE SAUERSTOFFMESSZELLE: DARSTELLUNG DER LINEAREN ABHÄNGIGKEIT VOM SAUERSTOFF-PARTIALDRUCK BEI ÄNDERUNG DER FLUGHÖHE.

für die Sauerstoffaufnahme vornehmen zu können, wurden für die Tage der Meßflüge von den Wetterämtern Tübingen und Sigmaringen Tagesprofile für Luftdruck, Temperatur und Luftfeuchte eingeholt. Die exspiratorischen Atemvolumina wurden fortlaufend unter Berücksichtigung der mittleren Flughöhe jeder Halbminute und unter Annahme einer feuchtadiabatischen Temperaturänderung, eines vertikalen Temperaturgradienten von 0,5°Celsius und eines Luftdruckgradienten von 12,5 mb je 100 m Höhendifferenz korrigiert (11,117).

3.3 Auswertung der registrierten Meßdaten

Die registrierten Meßgrößen wurden kontinuierlich für jede Halbminute ausgewertet und in Minutenwerten angegeben. Für jeden Flug kamen einschließlich der Vorstart-und Nachflug-Phase bis zu 24 Halbminuten zur Auswertung.
Abbildung 5 stellt schematisch die Auswertung der Versuchsphasen dar.

Abb. 5 Schematische Darstellung des Zeitverlaufs der Meßflüge und Zuordnung der einzelnen Flugphasen



ANMERKUNG: IN DEN NACHFOLGENDEN TABELLEN SIND DIE DATEN IN DER FOLGE DER HALBMINUTEN AUFGELISTET (WIE OBERSTE ZEILE).
IN DEN ABBILDUNGEN SIND DIE ZEITVERLÄUFE (ABSZISSE) WIE IN DER MITTLEREN UND UNTEREN ZEILE BEZEICHNET.

Aus den kontinuierlich registrierten Meßgrößen wurden die folgenden Parameter errechnet:

a) Atemminutenvolumen ($\dot{V}_E$ [l/min])
Das Atemminutenvolumen ($\dot{V}_E$) wurde durch Auszählen der Impulse (1 Impuls = 100 ml) aus dem Papierausschrieb (Abb. 2) und durch Umrechnung von ATPS auf BTPS ermittelt.

b) Atemfrequenz (AF [min^{-1}])
Für jede Halbminute wurde die Anzahl der Impulsverdichtungen (Abb. 2, Kanal "$\dot{V}_E$"), die einer Atemphase entsprechen, ausgezählt.

c) In-/exspiratorische Sauerstoffdifferenz ($^{F}iO_2$-$^{F}eO_2$ / ΔO_2 [%])
Für jede Halbminute wurde die mittlere in-/exspiratorische Sauerstoffdifferenz aus der Analogaufzeichnung (Abb. 2) nach Höhenkorrektur verwertet.

d) Sauerstoffaufnahme ($\dot{V}O_2$ [ml/min])
Aus der höhenkorrigierten in-/exspiratorischen Sauerstoffdifferenz (ΔO_{2corr}) und dem korrespondierenden Atemminutenvolumen-Wert ($\dot{V}_E$) jeder Halbminute wurde nach der Formel

$$\dot{V}O_2 = \frac{\dot{V}_E \times k \times \Delta O_{2\,corr}}{100}$$

die Sauerstoffaufnahme jeder Halbminute errechnet. Der Faktor k entspricht dem Umrechnungsfaktor für die Atemvolumina von BTPS auf STPD (41).

e) Sauerstoffaufnahme pro kg Körpergewicht ($\dot{V}O_2$/kg [ml/min/kg])
Die Werte wurden errechnet, indem aus Sauerstoffaufnahme und Körpergewicht der Quotient gebildet wurde.

f) Kalorischer Umsatz ([kJ/min · m^2] bzw. [kJ/min · m^2])
Mit Hilfe der Formel nach LUSK (72), erweitert durch den Umrechnungsfaktor von kcal in kJ (67):

$$E = 4{,}825 \times 4{,}1868 \times \dot{V}O_2$$

wurde der Umsatz unter Annahme eines RQ von 0,82 errechnet. Die Minutenwerte wurden zu der Körperoberfläche in Beziehung gesetzt. Die individuelle Körperoberfläche der Probanden wurde aus dem Nomogramm nach DU BOIS (33) abgelesen. Der mittlere kalorische Umsatz der einzelnen Flugphasen entsprach dem Mittelwert aller Halbminuten-Werte einer jeden Phase.

g) Herzfrequenz (HF $[min^{-1}]$)

Aus dem EKG wurde durch Auszählen der R-Zacken für jede Halbminute die Herzfrequenz ermittelt.

3.4 Spiroergometrischer Untersuchungsgang (Laborversuch)

In engem zeitlichen Zusammenhang zur fliegerischen Untersuchung unterzogen sich die Versuchspersonen einer umfassenden klinischen Untersuchung entsprechend der für alle Flugzeugführer zwingend vorgeschriebenen Fliegertauglichkeits-Untersuchung (82). Diese beinhaltete umfassende Anamnese, ärztliche Untersuchung und die Ableitung eines Ruhe-EKG im Liegen in 12 Ableitungen. Der Belastungstest wurde als Spiroergometrie durchgeführt. Klinische Untersuchung und Spiroergometrie dienten dem Ziel

a) nichtgeeignete Versuchspersonen für den Versuch auszuschließen,
b) eventuell falschpositive Ergebnisse im Feldversuch zu vermeiden und
c) die kardiozirkulatorische Leistungsfähigkeit jeder Versuchsperson mit einer allgemein anerkannten Ergometer-Methode festzustellen.

Die Spiroergometrie erfolgte als Fahrradergometerbelastung im Sitzen. Nach einer fünfminütigen Ruhephase wurde die Belastung mit 50 Watt begonnen und um jeweils 50 Watt nach 2 Minuten bis zur Erschöpfung der Versuchsperson gesteigert. Die Pedal-Umdrehungszahl wurde mit 60/min konstant gehalten. Der Belastungsphase schloß sich eine fünfminütige Erholungsphase an.

Für den Belastungstest stand ein wirbelstrom-gebremstes Fahrradergometer SIEMENS ELEMA Ergometriesystem 380 zur Verfügung.

Die Erfassung der Herzfrequenz erfolgte indirekt durch Integration der RR-Intervalle aus dem EKG der Brustwandableitungen. Das EKG in Ruhe und unter Belastung wurde auf einem Schreiber MINGOGRAPH (SIEMENS) aufgezeichnet.

Die pulmonalen Funktionsgrößen während der Ergometrie wurden mit einer rechnergestützen Anlage ERGO-PNEUMOTEST (JAEGER) erfaßt und registriert. Dieses Gerät mißt die exspiratorischen Volumina in einem "offenen System". Die Gasanalyse für CO_2 in der Atemluft erfolgt nach dem Prinzip der Infrarot-Absorption. Die in-/exspiratorische Sauerstoffdifferenz wird chemisch nach dem Prinzip der Brennstoffzelle analysiert. Ein terminal-gesteuerter Digitalcomputer, der die analogen Signale des Spiromaten verarbeitet, errechnet aus den eingegebenen anthropometrischen Daten der Versuchsperson die spiroergometrischen Sollwerte. Während der spiroergometrischen Untersuchung werden die Meßwerte jeweils über 30 Sekunden integriert und ausgedruckt.

Die folgenden Meßgrößen wurden berücksichtigt:

a) Atemminutenvolumen ($\dot{V}_E$) [l/min]

b) Atemfrequenz (AF) [min^{-1}]

c) Sauerstoffaufnahme ($\dot{V}O_2$) [ml/min]

d) Sauerstoffaufnahme/kg Körpergewicht ($\dot{V}O_2$/kg) [ml/min · kg]

e) Herzfrequenz (HF) [min^{-1}]

Für die Befundung während der Belastung wurden jeweils die letzten Halbminuten jeder Belastungsstufe herangezogen. Die Mittelwerte aus den letzten 3 Minuten der Kontrollphase vor Beginn der Belastung wurden als "Ruhewerte (Labor)" definiert, mit denen die beim Flug gemessenen kardiopulmonalen Daten verglichen wurden.

Die maximale Sauerstoffaufnahme jeder Versuchsperson, als objektives Kriterium der aeroben Kapazität, diente der Einteilung der Versuchspersonen in Kollektive unterschiedlicher kardiovaskulärer Ausdauerleistungsfähigkeit.

3.5 Probandengut

An den Untersuchungen nahmen 29 freiwillige, gesunde männliche Segelflugpiloten unterschiedlicher Flugerfahrung und differenten fliegerischen Ausbildungsstandes teil. Alle Piloten hatten in der laufenden Saison bereits regelmäßig geflogen.
Alle Piloten beteiligten sich an der fliegerischen Utersuchung; bei einer Versuchsperson konnte keine ergometrische Untersuchung durchgeführt werden.
Über die Altersstruktur des Kollektivs gibt Tabelle 1 Auskunft. Das Durchschnittsalter betrug 25,7 $\pm$ 5,4 Jahre.

Tab. 1 Altersstruktur des Piloten-Kollektivs

Alter (Jahre)	Anzahl VP (n)	Flugstunden $\bar{x}$	Flugstunden $s^{\pm}$
15 - 18	2	28,5	10,6
19 - 22	7	105,6	167,5
23 - 26	12	139,2	225,9
27 - 30	5	214	255
31 - 42	3	750	525,5
$\bar{x}$ = 25,7 $\pm$ 5,4	$\Sigma_{n=29}$	$\bar{x}$=218,2	$\pm$330,3

Die 29 Versuchspersonen (VP) wurden nach folgenden Kriterien untergliedert:

1) Startarten
2) kardiozirkulatorische Leistungsfähigkeit
3) Flugerfahrung.

Zu 1) Startarten

An Flügen mit Windenstart (W) nahmen 24 Piloten teil (VP 1 bis 24). Fünf Versuchspersonen flogen ihre Meßflüge mit Flugzeugschleppstart (F).

Zu 2) Kardiozirkulatorische Leistungsfähigkeit

Das Kollektiv der 24 Piloten mit Startart W wurde aufgrund der Ergebnisse der spiroergometrischen Untersuchung nach der relativen maximalen Sauerstoffaufnahme ($\dot{V}O_2max/kg$) in drei gleich große Quantile (Tertile) unterteilt. Das I. Tertil umfaßt innerhalb der Grundgesamtheit die Probanden mit den höchsten, das III. Tertil jene mit den niedrigsten Werten für $\dot{V}O_2max/kg$ (siehe Ergebnisteil "Spiroergometrische Untersuchung").

Zu 3) Flugerfahrung

Für die Untersuchung über den Einfluß der Flugerfahrung wurden die 24 Piloten mit Startart W in drei Gruppen unterschiedlicher Flugerfahrung eingeteilt, wobei flugpraktische Aspekte bestimmend waren:

Gruppe 1: Flugschüler bzw. Luftfahrerschein-Inhaber bis 25 Stunden Flugerfahrung. In der Praxis sind dies Piloten, die teils mit Fluglehrer, teils im Alleinflug in Flugplatznähe fliegen und geringe Erfahrungen im thermischen Segelflug besitzen.

Gruppe 2: Piloten mit Flugerfahrung zwischen 26 und 250 Flugstunden. Es sind Piloten durchschnittlicher Erfahrung im Thermik- und Überland-Flug und mittlerer Erfahrung bei Start und Landung unter unterschiedlich schwierigen Bedingungen.

Gruppe 3: Hocherfahrene Segelflugpiloten mit mehr als 250 Flugstunden. Alle Piloten dieser Gruppe wiesen überdurchschnittliche Leistungsflug-Erfahrung auf; drei VP waren Fluglehrer, drei VP besaßen eigene Hochleistungssegelflugzeuge.

Die Strukturmerkmale der Gruppen sind in Tabelle 15 (siehe Absatz 4.2.4) zusammengefaßt.

3.6 Statistische Behandlung der Daten[++]

Für die statistische Überprüfung der Gruppen wie auch der Quantile kam eine Rang-Varianzanalyse nach KRUSKAL-WALLIS zur Anwendung (109). Dieses nicht-parametrische Verfahren untersucht die Nullhypothese, daß eine Anzahl gruppierter Stichproben der gleichen Population entstammen. Ähnlich der parametrischen Varianzanalyse wird die Streuung der Stichprobenmittelwerte um den gemeinsamen Mittelwert untersucht: Stammen alle Stichproben aus derselben Grundgesamtheit, so sollen die Varianzen ungefähr gleichgroß sein. Ist der Prüfquotient (Varianz zwischen den Stichproben zur Varianz innerhalb der Stichproben) kleiner als die Signifikanzschranke, so stammen alle Stichproben aus derselben Grundgesamtheit, d.h. Gruppenunterschiede sind statistisch nicht signifikant. Die KRUSKAL-WALLIS Rang-Varianzanalyse ist bis zu gewissen Grenzen verteilungsfrei. Die Absolutwerte werden durch Rangnummern ersetzt, die H-Werte unter Annahme einer Chi-Quadrat-Verteilung auf Signifikanz überprüft. Dabei fand die folgende Formel Anwendung:

$$H = \frac{12}{(N+1)} \cdot \sum_{j=1}^{k} \frac{R_j}{n_j} - 3(N+1)$$

k = Anzahl der Gruppen

n_j = Anzahl der Beobachtungen

N = $\Sigma\, n_j$

R_j = Rangsumme in Gruppe j

Jede der 24 Halbminuten wurde dementsprechend berechnet. Die Empfindlichkeit des Tests wird, gemessen am F-Test, dem empfindlichsten parametrischen Test, mit ca. 90% angegeben (109).

Als Signifikanzschranke wurde $p \leq 0{,}05$ festgelegt. Die p-Werte sind aus Verteilungstafeln (41) entnommen.

Für die Berechnungen wurde ein Digital-Rechner WANG 2200 verwendet.

[++]Herrn Dipl.-Psych. E. SCHWARTZ (DFVLR-Institut für Flugmedizin) sei an dieser Stelle für die Erarbeitung der Statistikprogramme gedankt.

4. ERGEBNISSE

4.1 Spiroergometrische Untersuchung

Die Ergebnisse der Fahrradergometer-Belastung, der sich 28 der 29 Versuchspersonen (VP) unterzogen, sind in Tabelle 3 zusammengefaßt. Hierbei sind für die Kollektive mit Startart W und F die kardialen und pulmonalen Ruhewerte sowie die spiroergometrischen Maximalwerte als Mittelwerte aufgelistet. Die detaillierte Zusammenstellung der anthropometrischen Daten, der spiroergometrischen Ruhe- und Maximalwerte jeder einzelnen VP findet sich im tabellarischen Anhang (Tabellen 26 und 27).

Die Ruhewerte ("Ruhe Labor ") wurden später den im Flugzeug gewonnenen Werten als Referenzgrößen zugeordnet.

Des weiteren wurden die Ergebnisse aus der 50-Watt-Stufe von den 24 VP (W) zusammengestellt (Tab. 23), um einen Vergleich zwischen der kardiopulmonalen Regulation beim Fliegen und bei vergleichbarer körperlicher Arbeit zu ermöglichen (siehe Absatz 5.2).

Die relative maximale Sauerstoffaufnahme ($\dot{V}O_2max/kg$ Körpergewicht), die von jeder VP bei der ausbelastenden spiroergometrischen Untersuchung gewonnen wurde, diente als Kriterium für die Einteilung der 24 Piloten (W) in drei gleich große Quantile (Tab. 2).

Tab. 2 Einteilung der 24 Piloten mit Windenstart nach der individuell erreichten maximalen Sauerstoffaufnahme

Quantil	VP n	Alter Jahre	Größe cm	Gewicht kg	Leistung max W/kg	max O_2-Aufnahme $\dot{V}_{O_2}max/kg$
I.Tertil	8	$^{25,2}_{-3,0}$	$\pm 181,4 \pm 5,7$	$^{65,4}_{-3,2}$	$^{4,7}_{-0,4}$	$^{52,0}_{-4,0}$
II.Tertil	8	$^{30,4}_{-5,7}$	$\pm 177,6 \pm 3,5$	$^{70,1}_{-5,1}$	$^{3,9}_{-0,5}$	$^{43,3}_{-3,0}$
IIITertil	8	$^{23,9}_{-2,2}$	$\pm 184,3 \pm 6,0$	$^{76,9}_{-8,9}$	$^{3,6}_{-0,3}$	$^{40,0}_{-1,9}$
Signif.(p)		n.s.	n.s.	<0,05	<0,001	<0,01

Erläuterung zu Tabelle 2:

I. Tertil: Versuchspersonen mit einer maximalen Sauerstoffaufnahme/kg Körpergewicht zwischen 120 und 101% ($\bar{x}$ = 110,9 $\pm$ 7,1%) der individuell errechneten Sollwerte für diesen Parameter, damit Versuchspersonen mit überdurchschnittlicher aerober Kapazität innerhalb des Gesamtkollektivs (n=24). In diesem Tertil fanden sich vornehmlich jene VP wieder, die bei vorheriger Befragung Ausdauersportarten wie Langlauf, Rudern, Radsport und Schwimmen angegeben hatten.

II. Tertil: Versuchspersonen mit erreichten 100 bis 91% ($\bar{x}$ = 95,3 $\pm$ 4,2%) der Sollwerte für $\dot{V}O_2max$/kg Körpergewicht, somit Personen durchschnittlicher aerober Kapazität innerhalb des Gesamtkollektivs.

III. Tertil: Versuchspersonen mit maximaler Sauerstoffaufnahme/kg Körpergewicht zwischen 89 und 72% (83,7 $\pm$ 5,7%) der Sollwerte, somit Personen unterdurchschnittlicher aerober Kapazität innerhalb des Gesamtkollektivs.

Die Unterschiede in der aeroben Kapazität, ausgedrückt in $\dot{V}O_2max$/kg und in erreichten Prozent von Soll-$\dot{V}O_2max$/kg (54), sind zwischen den Tertilen signifikant ($p<0,001$).

TABELLE 3: SPIROERGOMETRISCH ERMITTELTE RUHE- UND MAXIMALWERTE (MITTELWERTE) DER PARAMETER $\dot{V}_E$, AF, $\dot{V}_{O2}$ UND HF ; ERGEBNISSE DER LABORUNTERSUCHUNG.

SPIROERGOMETRIE:	RUHEWERTE ($\bar{x}$)				MAXIMALWERTE ($\bar{x}$)			
ANZAHL VP (STARTART)	$\dot{V}_E$ [l/min]	AF [min^{-1}]	$\dot{V}o_2$ [ml/min] $\dot{V}o_2$/KG [ml/min·kg]	HF [min^{-1}]	$\dot{V}E$ [l/min]	AF [min^{-1}]	$\dot{V}o_2$ [ml/min] $\dot{V}o_2$/KG [ml/min·kg]	HF [min^{-1}]
23 (W)	9,6 1,8	14,9 ± 3,5	294 ± 51 4,2 ± 0,7	72,4 ±10,4	111,8 ± 19,9	43,6 ± 7,7	3189 ± 308 45,2 ± 6,0	185,9 ± 6,6
5 (F)	10,0 ± 2,0	14,2 ± 2,5	312 ± 16 4,6 ± 0,7	81,0 ±13,8	128,6 ± 27,7	47,2 ± 9,9	3628 ± 573 53,3 ± 8,6	199,6 ± 5,7
28 (W+F)	9,7 ± 1,8	14,8 ± 3,3	297 ± 47 4,2 ± 0,7	74,0 ±11,3	114,8 ± 21,9	44,3 ± 8,0	3267 ± 394 46,6 ± 7,1	188,4 ± 8,3

4.2 Untersuchung beim Fliegen (Feldversuch)

4.2.1 Feststellung der körperlichen Arbeit beim Steuern des Segelflugzeuges
Von zwei Fluglehrern wurden während dreier Meßflüge die Ruderkräfte (statische und dynamsche Muskelbeanspruchung) mittels einer an den Steuerelementen befestigten Federwaage gemessen (Tab. 4).

Tab. 4 Ruderkräfte des Meßflugzeuges "BERGFALKE II" im Normalflug

Steuerelement	Ruderkräfte (Mittelwerte)	
Höhenruder (Steuerknüppel)	Start:	2,5kp
	Flug:	2,5kp
Querruder (Steuerknüppel)	Kurvenflug 30°:	2,5kp
Seitenruder (Fußpedale)	Kurvenflug 30°:	7,0kp
Bremsklappen (Handhebel)	Entriegeln (Landung):	10,5kp

An einer VP wurden im Labor in vier Versuchen derartige Kraftbelastungen mit Hilfe von Federwaagen-Zug simuliert und dabei spirometrische Messungen durchgeführt. Die Meßdaten bei statischer Muskelbeanspruchung entsprechend der Ruderbetätigung zeigten eine deutliche Steigerung gegenüber Ruhewerten (Tab. 5).

Tab. 5 Spirometrische Meßwerte einer Versuchsperson in Ruhe und während statischer Muskelbeanspruchung entsprechend den gemessenen Ruderkräften

Tätigkeit	$\dot{V}_E$ (l/min)	$\dot{V}_{O_2}$ (ml/min)	AF (min^{-1})
Ruhe, sitzend	7,9	249	12
simulierte Ruderbetätigung (3 min.)	$\overset{13,8}{-1,8}$	$\overset{439}{-78}$	$\overset{20}{-2,4}$

4.2.2 Das Verhalten kardiopulmonaler Parameter bei unterschiedlicher Startart

4.2.2.1 Windenstart (Abb. 6, Tab. 6 und 8)+

Bei allen 24 VP wurden gleichsinnige Veränderungen der kardiopulmonalen Parameter festgestellt. Die Parameter Atemminutenvolumen ($\dot{V}_E$), Atemfrequenz (AF), Sauerstoffaufnahme ($\dot{V}O_2$) und Herzfrequenz (HF) zeigten flugphasenspezifische Veränderungen, während die in-/exspiratorische Sauerstoffdifferenz (Fi_{O_2}-Fe_{O_2}) nur geringfügige Schwankungen aufwies, die eine Zuordnung zu einzelnen Flugphasen nicht erkennen ließ. In der Vorstart-Phase, in der die VP im Flugzeug sitzend die letzten Startvorbereitungen durchführten, lagen die Meßwerte aller Parameter in nahezu gleichbleibendem Niveau, ließen jedoch zur letzten Minute der Vorstart-Phase hin einen leicht ansteigende Tendenz erkennen. Zeitgleich mit dem Beginn des Startmanoevers, d.h. mit dem Anheben des am Boden abgelegten Flügels und mit dem langsamen Straffen des Windenseils (letzte Halbminute der Vorstart-Phase) zeigten die Parameter mit Ausnahme von ($^{Fi}O_2$-$^{Fe}O_2$) einen deutlichen Anstieg. Während des Windenstarts stiegen die Werte weiter steil an und erreichten 30 Sekunden nach dem Abheben des Flugzeuges ein Maximum. Innerhalb der nachfolgenden zwei Minuten erfuhren die Parameter in der Flug-Phase einen allmählichen Rückgang der Werte auf ein Niveau, welches etwa die Mitte zwischen Vorstart- und den maximalen Startwerten bildete. Der Rückgang der Werte erfolgte für HF und AF innerhalb von 30 bis 60 Sekuden, für $\dot{V}_E$ und $\dot{V}O_2$ in ca. 120 Sekunden.

Mit dem Beginn des Landeanflugs, d.h. vom Beginn des Gegenanflugs von der "Position" aus, war ein allmähliches Ansteigen der Werte zu verzeichnen, das sich im weiteren Verlauf der Lande-Phase fortsetzte. In der Halbminute der Landung erreichten die Meßwerte ein Maximum vergleichbar dem der StartPhase. Unmittelbar nach der Landung (Nachflug-Phase) erfolgte ein rascher Abfall der Werte auf ein Niveau entsprechend der Vorstart-Phase.

Gegenüber den Ruhewerten (Labor) wiesen die gemessenen Parameter prozentual unterschiedlich hohe Änderungen während der einzelnen Flugphasen auf. Abbildung 8 stellt die Steigerungen der Werte für $\dot{V}_E$, $\dot{V}O_2$ und HF gegenüber den Ruhewerten (Labor) dar, die als 100% gesetzt wurden. In der Vorstart-Phase waren die Parameter $\dot{V}_E$, AF, $\dot{V}O_2$ und HF um 30 bis 50% höher als die Ruhewerte (Labor). Die prozentuale Steigerung in der Start- wie auch in der Lande-Phase war für $\dot{V}_E$ mit 130 bis 150% oberhalb der Ruhewerte (Labor) am stärksten ausgeprägt; die übrigen Parameter erfuhren eine Steigerung um 80 bis 90%. In der Flug-Phase stellten sich die Werte auf ein Niveau ein, das zwischen 60% ($\dot{V}O_2$, HF) und 80% (AF, $\dot{V}_E$) über den Ruhewerten (Labor) lag. Die Werte der Vorstart- und der Nachflug-Phase waren einander ähnlich.

+Die detaillierte Aufstellung der Rohdaten jeder einzelnen VP findet sich in den Tabellen 28 bis 34 im tabellarischen Anhang.

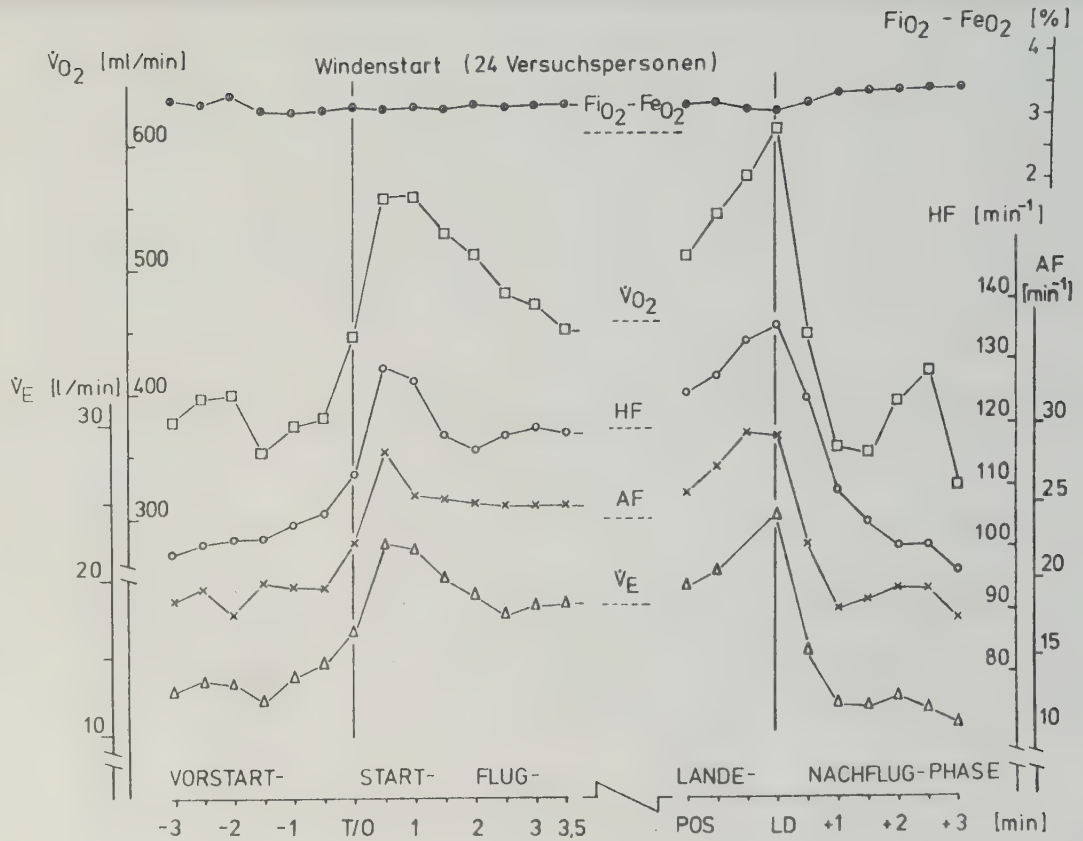


ABB. 6: ÜBERSICHT ÜBER DAS VERHALTEN DER BEOBACHTETEN KARDIOPULMONALEN MESSGRÖSSEN BEI FLÜGEN MIT WINDENSTART. AUS GRÜNDEN DER ÜBERSICHTLICHKEIT SIND NUR MITTELWERTE DARGESTELLT; DIE ZUGEHÖRIGEN STANDARDABWEICHUNGEN SIND DER TABELLE 6 ZU ENTNEHMEN.

TABELLE 6: VERHALTEN DER KARDIOPULMONALEN MESSGRÖSSEN $\dot{V}_E$, AF, $\dot{V}_{O2}$ UND HF BEI FLÜGEN MIT WINDENSTART. ES SIND ANZAHL DER STICHPROBEN (N), KLEINSTER (MIN) UND GRÖSSTER (MAX) STICHPROBENWERT, MITTELWERT ($\bar{x}$) UND ZUGEHÖRIGE STANDARDABWEICHUNG INNERHALB JEDER HALBMINUTE UND FÜR JEDE DER MESSGRÖSSEN AUFGELISTET.

		HALBMINUTEN																							
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
$\dot{V}_E$ (l/min)	N =	16	11	12	17	22	23	24	24	24	23	23	20	20	19	24	24	24	24	16	15	14	10	7	8
	MAX	23,1	23,0	19,8	20,2	22,0	22,2	29,5	39,2	35,2	29,9	27,7	27,3	26,8	31,9	39,2	37,2	38,5	38,5	22,0	17,6	16,7	17,8	17,4	15,4
	MIN	6,6	7,3	9,0	7,5	7,3	6,8	7,5	7,0	9,7	9,8	7,9	8,6	8,6	7,9	7,0	8,1	13,2	10,8	6,8	5,3	6,8	6,8	6,8	6,8
	$\bar{x}$	12,8	13,5	13,4	12,3	13,9	14,7	15,8	22,3	22,2	20,3	19,1	17,9	18,3	18,5	19,6	20,6	25,1	24,1	15,5	12,0	12,0	12,6	11,7	10,6
	SD ±	4,7	5,2	3,4	3,5	4,1	3,8	4,8	7,5	5,7	5,5	5,5	5,2	5,4	6,2	6,6	5,9	8,4	6,1	4,0	3,7	3,3	4,0	4,4	3,6
AF (min^{-1})	N =	18	9	13	17	22	23	24	24	24	24	23	23	23	19	24	24	24	24	16	15	13	10	7	10
	MAX	26	31	25	28	28	29	40	38	36	38	36	36	36	38	38	39	42	42	30	26	26	28	24	24
	MIN	12	14	13	12	14	10	16	11	13	14	10	14	14	15	17	16	16	18	14	10	12	12	12	12
	$\bar{x}$	18,6	19,2	17,8	19,9	19,5	19,5	22,3	28,1	25,5	25,2	24,9	24,7	24,7	24,8	25,5	27,2	29,4	29,3	22,2	18,1	18,5	19,3	19,3	11,6
	SD ±	3,8	5,6	3,8	4,5	4,0	4,6	5,4	6,9	5,8	6,2	6,6	5,5	6,1	6,2	5,8	6,1	6,2	6,3	4,8	4,8	4,6	5,0	4,7	3,4
$\dot{V}_{O2}$ (ml/min)	N =	10	8	10	15	21	22	24	24	24	23	22	20	20	15	24	24	24	24	17	15	12	8	5	3
	MAX	445	494	469	401	486	603	863	839	823	776	770	708	611	596	787	757	821	783	734	508	503	493	535	390
	MIN	304	267	304	216	226	217	267	273	398	325	310	325	245	319	275	368	432	432	310	180	233	275	248	231
	$\bar{x}$	379	398	399	336	373	381	446	559	562	533	515	484	472	453	512	546	574	614	449	358	352	395	418	330
	SD ±	40	68	59	59	78	92	141	146	128	134	126	103	99	79	119	99	106	98	128	103	79	86	109	87
HF (min^{-1})	N =	15	12	14	18	20	24	24	24	24	24	23	23	22	18	24	24	24	24	21	18	14	9	8	6
	MAX	122	119	121	121	136	136	145	156	161	163	169	167	165	150	160	162	161	161	148	138	131	129	129	128
	MIN	78	84	83	83	88	77	77	100	97	82	74	73	76	85	87	89	88	89	74	68	84	85	84	79
	$\bar{x}$	99	101	101	102	104	106	112	129	127	119	116	118	120	119	125	128	134	136	124	109	104	100	100	96
	SD ±	14	12	13	12	12	13	17	17	18	21	21	21	22	18	17	17	19	19	18	19	11	13	14	17

4.2.2.2 Flugzeugschleppstart (Abb. 7, Tab. 7 und 8)[+]

Die kardiopulmonalen Parameter verhielten sich beim Flugzeugschleppstart qualitativ ähnlich wie beim Windenstart; die Veränderungen in Abhängigkeit von den Flugphasen wurden bei allen 5 VP gleichsinnig beobachtet. Wie auch bei W blieb die in-/exspiratorische Sauerstoffdifferenz als einziger der gemessenen Parameter ohne flugphasentypische Änderungen.

Die in der frühen Vorstart-Phase ausgeglichenen Werte zeigten in der letzten Minute vor dem Start einen flachen Anstieg. Dieser Zeitraum beinhaltete Einklinken des Schleppseils, Anheben der Tragfläche, Anrollen des Schleppflugzeuges und Anschleppen des Segelflugzeuges. In der Start-Phase erreichten die Meßwerte plateauartig ein Maximum für die Dauer von ca. 2 Minuten entsprechend der Zeit des Flugzeugschlepps. Bei drei der fünf VP wurde in der Halbminute des Ausklinkens ein neuerlicher Anstieg der Meßwerte beobachtet, gefolgt vom allmählichen Rückgang der Werte auf das Niveau der Flug-Phase.

Unabhängig von der Startart sind die Lande- und die Nachflug-Phase gleich. Dementsprechend wurden unterschiedliche Verhalten der Parameter bei den Kollektiven mit Windenstart bzw. Flugzeugschleppstart nicht festgestellt.

Gegenüber den Ruhewerten (Labor), die als 100% gesetzt wurden, erhöhten sich die kardipulmonalen Meßwerte bei den Flügen mit Flugzeugschleppstart in ähnlichem Maße wie beim Windenstart (Abb. 8). In der Vorstart-Phase stieg $\dot{V}_E$ um 60%, HF und AF um 40 bis 50%, demgegenüber $\dot{V}O_2$ um 10 bis 20%. Während der Start-Phase erreichte $\dot{V}_E$ mit 110 bis 120% die höchste, $\dot{V}O_2$ mit 60% die niedrigste Steigerung; HF und AF lagen gemeinsam bei etwa 80 bis 90% oberhalb der Ruhewerte (Labor).

In der Lande- und Nachflug-Phase sind die Ergebnisse in Abb. 8 gemeinsam mit den Ergebnissen der Flüge mit Windenstart dargestellt. Es wird deutlich, daß bei Flügen mit Flugzeugschleppstart die kardiopulmonale Reaktion bei Start und bei Landung ähnliche Ausmaße erfuhr.

4.2.2.3 Kalorischer Umsatz bei Winden- und Flugzeugschleppstart (Abb. 9, Tab. 9)

Ausgehend von einem Ruheumsatz (Labor) von 3,12 $\pm$ 0,50 kJ/min $\cdot$ m^2 (24 Piloten mit Startart W) bzw. 3,39 $\pm$ 0,37 kJ/min $\cdot$ m^2 (5 Piloten mit Startart F) war während aller Flugphasen der kalorische Umsatz deutlich erhöht. In der Vorstart-Phase lag die Steigerung bei 30% (W) bzw. 32% (F). In der Start-Phase erfolgte ein weiterer Anstieg auf 98% (W) bzw. 93% (F) über Ruhe (Labor), d.h. der Ruheumsatz erfuhr nahezu eine Verdoppelung.

[+]Die detaillierte Aufstellung der Rohdaten jeder einzelnen VP findet sich in den Tabellen 34 und 35 im tabellarischen Anhang.

In der Flug-Phase lagen die Werte bei 73% (W) bzw. 63% (F) oberhalb Ruhe (Labor), um in der Lande-Phase mit 95% (W) bzw. 78% (F) erneut eine Höhe zu erreichen, die der Start-Phase vergleichbar war. Mit 41% (W) bzw. 25% (F) Überhöhung gegenüber Ruhe (Labor) entsprachen die Werte der Nachflug-Phase dem Niveau der Vorflug-Phase.

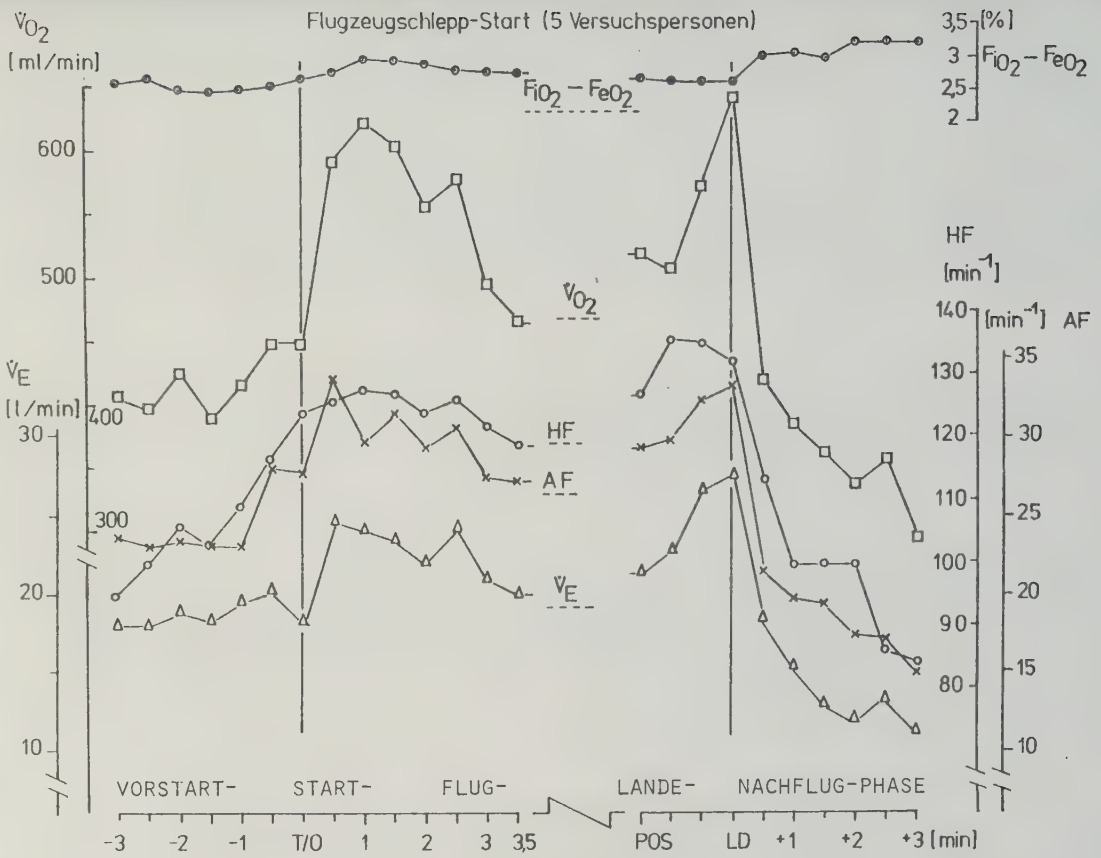


ABB. 7: ÜBERSICHT ÜBER DAS VERHALTEN DER BEOBACHTETEN KARDIOPULMONALEN MESSGRÖSSEN BEI FLÜGEN MIT FLUGZEUGSCHLEPPSTART. AUS GRÜNDEN DER ÜBERSICHTLICHKEIT SIND NUR MITTELWERTE DARGESTELLT; DIE ZUGEHÖRIGEN STANDARDABWEICHUNGEN SIND DER TABELLE 7 ZU ENTNEHMEN.

TABELLE 7: VERHALTEN DER KARDIOPULMONALEN MESSGRÖSSEN $\dot{V}_E$, AF, $\dot{V}_{O_2}$ UND HF BEI FLÜGEN MIT FLUGZEUGSCHLEPPSTART. ES SIND ANZAHL DER STICHPROBEN (N), KLEINSTER (MIN) UND GRÖSSTER (MAX) STICHPROBENWERT, MITTELWERT ($\bar{X}$) UND ZUGEHÖRIGE STANDARDABWEICHUNG ($SD^{\pm}$) INNERHALB JEDER HALBMINUTE UND FÜR JEDE MESSGRÖSSE AUFGELISTET.

		HALBMINUTEN																							
	VP	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
$\dot{V}_E$ (l/min)	N =	3	2	3	4	4	4	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	4	4	4	3	2	2
	MAX	21,6	18,0	21,1	20,5	23,5	23,3	24,2	34,3	33,2	31,2	28,4	32,3	26,0	28,4	25,5	32,8	36,7	36,7	24,9	21,1	15,7	16,5	14,7	12,5
	MIN	15,6	17,8	16,1	16,5	15,8	17,4	14,5	19,1	20,5	20,5	17,6	19,8	17,8	16,5	18,7	17,4	21,6	24,9	11,9	13,0	9,5	8,8	12,8	10,6
	$\bar{X}$	18,0	17,9	18,8	18,3	19,7	20,4	18,2	24,8	24,2	23,7	22,0	24,4	20,8	20,0	21,5	22,8	26,9	27,8	18,5	15,5	13,1	12,4	13,8	11,6
	$SD^{\pm}$	3,9	0,1	2,5	1,9	3,5	2,4	3,9	5,7	5,4	4,3	4,0	5,3	3,4	4,8	3,2	5,9	5,7	5,0	5,4	3,8	2,9	3,9	1,3	1,3
AF (min^{-1})	N =	3	2	3	4	4	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	4	4	4	3	2	2
	MAX	28	24	28	26	24	34	32	46	38	40	38	36	34	34	37	37	40	40	24	22	24	22	18	16
	MIN	20	22	18	18	22	24	24	27	22	26	21	23	20	18	24	20	28	28	20	16	16	14	16	14
	$\bar{X}$	23,7	23,0	23,3	23,0	23,0	28,0	27,8	33,8	29,8	31,6	29,4	30,6	27,4	27,2	29,4	29,8	32,4	33,2	21,5	19,8	19,5	17,3	17,0	15
	$SD^{\pm}$	4,0	1,4	5,0	3,5	1,2	3,7	3,0	8,8	6,7	6,1	7,3	5,6	6,5	6,3	5,2	6,9	6,1	5,6	1,7	2,6	3,4	4,2	1,4	1,4
HF (min^{-1})	N =	3	3	3	4	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	4	2	2
	MAX	99	106	113	113	131	134	136	138	153	141	139	141	136	136	145	163	156	145	127	114	113	122	92	91
	MIN	92	90	96	88	88	104	104	108	100	108	105	110	110	101	106	114	120	120	102	83	83	80	79	76
	$\bar{X}$	94	99	106	102	108	115	123	125	127	126	123	125	120	118	126	135	134	131	112	99	99	99	86	84
	$SD^{\pm}$	4	8	9	12	16	12	13	19	22	15	15	13	14	16	16	21	16	12	13	12	12	17	9	11
$\dot{V}_{O_2}$ (ml/min)	N =	3	2	3	4	4	4	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	3	3	3	2	1	1
	MAX	585	457	536	538	452	554	677	709	683	722	716	859	670	562	601	352	747	773	435	429	450	397	360	296
	MIN	307	330	337	272	307	369	353	468	539	498	401	455	383	370	408	680	357	532	385	330	299	277	360	296
	$\bar{X}$	403	394	420	387	413	446	446	585	619	601	551	575	493	464	516	505	568	642	418	385	353	337	360	296
	$SD^{\pm}$	158	90	104	120	71	89	132	89	64	83	119	168	106	76	93	118	141	120	29	50	84	85	000	000

TABELLE 8: VERHALTEN DER IN-/EXSPIRATORISCHEN SAUERSTOFFDIFFERENZ ($F_{iO2}-F_{eO2}$) BEI FLÜGEN MIT WINDENSTART (OBEN) UND FLUGZEUGSCHLEPPSTART (F-SCHLEPP, UNTEN). ES SIND ANZAHL DER STICHPROBEN (N), KLEINSTER (MIN) UND GRÖSSTER (MAX) STICHPROBENWERT, MITTELWERT ($\bar{x}$) UND ZUGEHÖRIGE STANDARDABWEICHUNG ($SD^{\pm}$) INNERHALB JEDER HALBMINUTE AUFGELISTET.

		HALBMINUTEN																							
WINDE		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
	N =	10	8	11	19	23	24	24	24	22	24	22	21	21	19	23	23	23	23	17	17	12	8	5	4
$F_{iO_2}-F_{eO_2}$	MAX	4,1	4,3	4,3	4,5	4,4	4,4	4,5	4,3	4,2	4,4	4,3	4,4	4,3	4,3	4,0	4,2	4,2	4,0	4,1	4,1	4,2	4,0	3,8	4,0
	MIN	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,4	2,4	2,4	2,4	2,3	2,3	2,4	2,6	2,5	2,5	2,6	2,4	2,4	2,6	2,7	2,8	2,6	3,1	3,1
(%)	$\bar{x}$	3,3	3,3	3,4	3,2	3,1	3,2	3,2	3,1	3,2	3,1	3,2	3,2	3,2	3,2	3,2	3,2	3,1	3,1	3,2	3,4	3,4	3,4	3,4	3,5
	$SD^{\pm}$	0,5	0,7	0,6	0,6	0,5	0,6	0,6	0,5	0,6	0,6	0,6	0,5	0,5	0,5	0,5	0,4	0,5	0,5	0,4	0,4	0,4	0,4	0,3	0,4
F-SCHLEPP																									
	N =	4	3	3	4	4	4	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	4	4	4	3	2	1
	MAX	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,2	3,5	3,8	3,8	3,8	3,7	3,6	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,8	4,0	3,7	3,8	3,8	2,7
$F_{iO_2}-F_{eO_2}$	MIN	2,2	2,2	2,0	2,1	2,2	2,3	2,3	2,1	2,4	2,4	2,1	1,9	2,1	2,1	1,9	2,0	1,8	1,6	2,2	2,2	2,0	2,9	2,8	2,7
(%)	$\bar{x}$	2,6	2,6	2,5	2,5	2,5	2,6	2,7	2,8	3,0	3,0	3,0	3,0	2,8	2,8	2,7	2,7	2,7	2,7	3,1	3,2	3,1	3,4	3,3	2,7
	$SD^{\pm}$	0,4	0,4	0,5	0,4	0,4	0,3	0,4	0,6	0,6	0,6	0,6	0,7	0,7	0,6	0,6	0,6	0,7	0,5	0,8	0,8	0,8	0,5	0,7	0,0

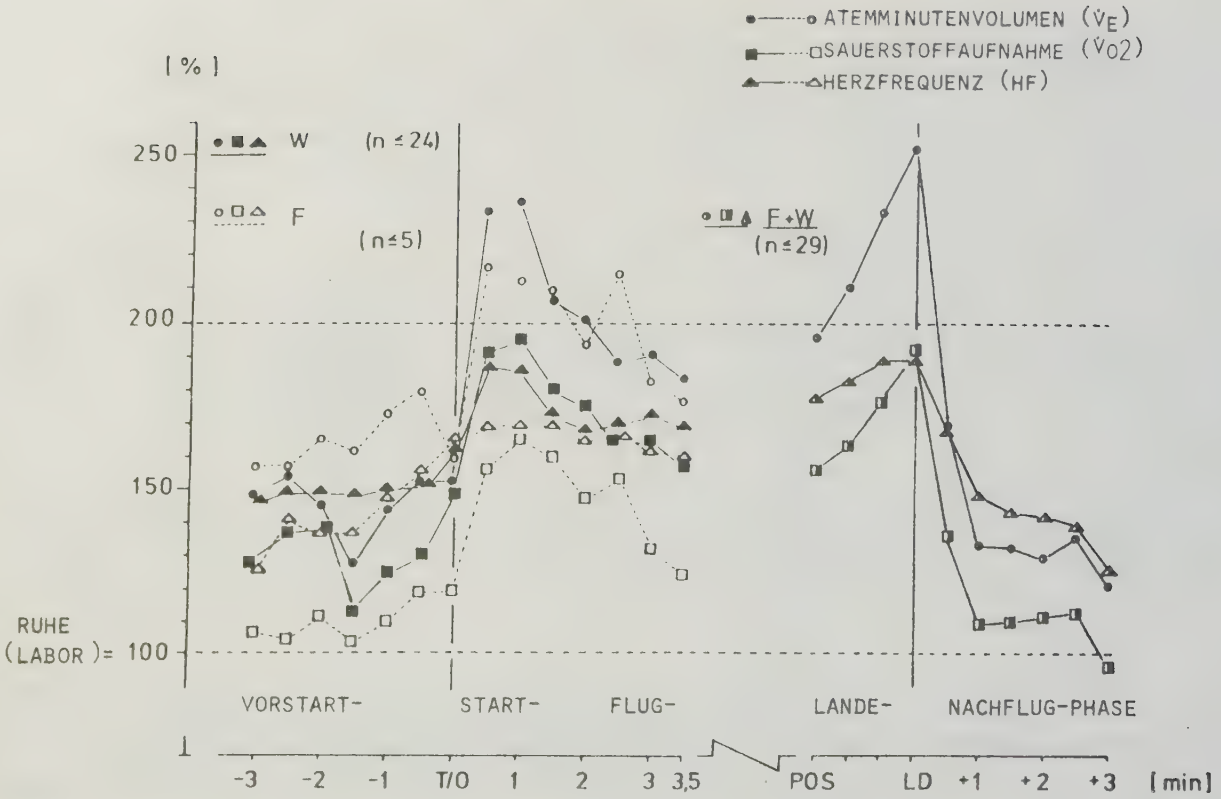


ABB. 8: ÜBERSICHT ÜBER DIE MITTLEREN PROZENTUALEN ÄNDERUNGEN VON ATEMMINUTENVOLUMEN, SAUERSTOFFAUFNAHME UND HERZFREQUENZ BEZOGEN AUF DIE UNTER LABORBEDINGUNGEN ERMITTELTEN RUHEWERTE, DIE ALS 100 % GESETZT SIND.
DIE MITTELWERTE DER STARTARTEN W UND F SIND IN DER START-PHASE GESONDERT, IN DER LANDE-PHASE GEMEINSAM DARGESTELLT.

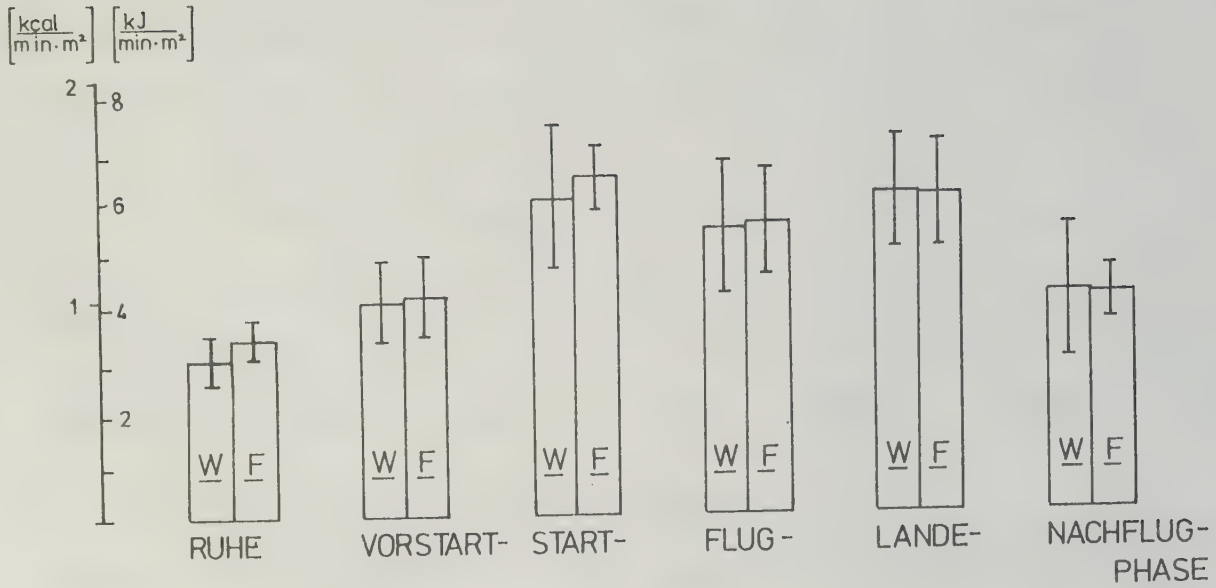


ABB. 9: SEGELFLUG: KALORISCHER UMSATZ (BEZOGEN AUF DIE KÖRPEROBERFLÄCHE) BEI FLÜGEN MIT WINDENSTART (W) UND FLUGZEUGSCHLEPPSTART (F).

TABELLE 9: KALORISCHER UMSATZ (BEZOGEN AUF DIE KÖRPEROBERFLÄCHE) BEI WINDENSTART (24 PILOTEN) UND BEI FLUGZEUGSCHLEPPSTART (5 PILOTEN). ES SIND DIE MITTELWERTE UND DIE ZUGEHÖRIGEN STANDARDABWEICHUNGEN ANGEGEBEN.

STARTART	VORSTART-	N	START-	N	FLUG-	N	LANDE-	N	NACHFLUG-	N	PHASE
WINDE (Kcal/min·m²)	0,97±0,16	24	1,48±0,33	24	1,29±0,30	22	1,45±0,27	24	1,05±0,27	17	
(KJ /min m²)	4,06±0,67		5,95±1,39		5,39±1,26		6,07±1,14		4,40±1,15		
F-SCHLEPP (Kcal/min·m²)	1,07±0,16	5	1,56±0,12	5	1,32±0,24	5	1,44±0,26	5	1,01±0,08	3	
(KJ /min·m²)	4,51±0,68		6,51±0,50		5,52±0,99		6,00±1,11		4,25±0,32		

4.2.3 Der Einfluß der kardiozirkulatorischen Leistungsfähigkeit auf das Verhalten kardiopulmonaler Parameter beim Segelflug

Für die drei Quantile von jeweils acht Piloten (siehe Abschnitt 4.1) sind die Ergebnisse als Mittelwerte, Standardabweichungen, Minimal- und Maximalwerte für jeden Parameter in Tabellen 10 bis 14 zusammengefaßt und in Abbildungen 10 bis 14 dargestellt.

Bei allen Probanden in den Tertilen erfuhren die Parameter die flugphasenspezifischen Änderungen wie vorhergehend beschrieben.

Bei keinem der untersuchten Parameter ließen sich statistisch zu sichernde Unterschiede zwischen den Tertilen unterschiedlicher kardiozirkulatorischer Leistungsfähigkeit feststellen. Als Tendenz ist lediglich festzuhalten, daß die Mittelwerte aller Parameter des III. Tertils während der gesamten Dauer des Fluges jeweils höher lagen als die Mittelwerte der übrigen Tertile.

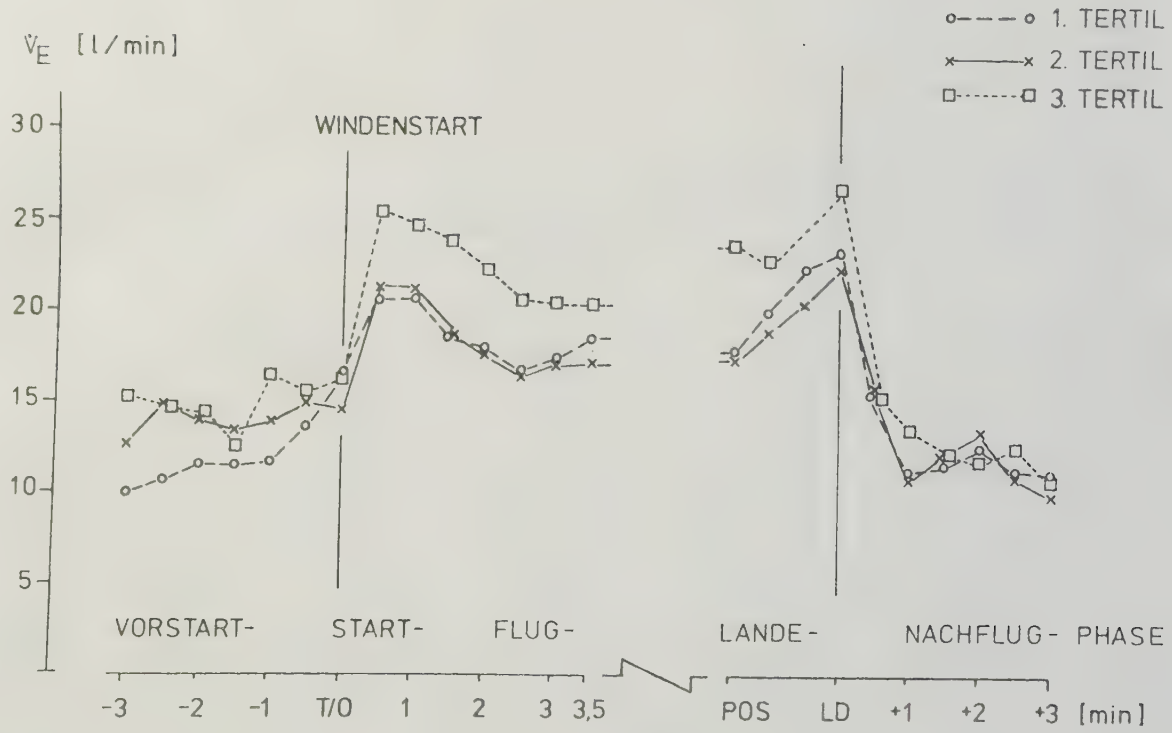


ABB. 10

SEGELFLUG: DARSTELLUNG DER MITTELWERTE DES ATEMMINUTENVOLUMENS IN ABHÄNGIGKEIT VON DER KARDIOZIRKULATORISCHEN LEISTUNGSFÄHIGKEIT. DIE ZUGEHÖRIGEN STANDARD-ABWEICHUNGEN SIND DER TABELLE 10 ZU ENTNEHMEN.

TABELLE 10: VERHALTEN DES ATEMMINUTENVOLUMENS BEIM SEGELFLUG IN ABHÄNGIGKEIT VON DER KARDIOZIRKULATORISCHEN LEISTUNGSFÄHIGKEIT.
ES SIND ANZAHL DER STICHPROBEN (N), KLEINSTER (MIN) UND GRÖSSTER (MAX) STICHPROBENWERT, MITTELWERT ($\bar{X}$) UND ZUGEHÖRIGE STANDARDABWEICHUNG ($SD^{\pm}$) INNERHALB JEDES TERTILS UND JEDER HALBMINUTE AUFGELISTET.

HALBMINUTEN

		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
I.Qu.	N =	4	3	3	7	8	8	8	8	8	8	8	7	7	6	8	8	8	8	6	6	5	3	2	2
V_E (l/min)	MAX	12,8	12,8	13,0	18,9	15,0	18,7	21,1	25,3	24,0	23,1	26,6	25,5	25,3	25,1	25,1	24,6	25,7	29,9	20,2	17,6	15,2	17,8	15,8	15,4
	MIN	6,6	7,3	10,6	7,5	7,3	6,8	10,6	15,8	18,5	15,2	12,5	13,2	11,0	13,4	12,8	14,5	18,7	19,4	6,8	5,3	6,8	6,8	6,8	6,8
	$\bar{X}$	9,9	10,7	11,5	11,5	11,7	13,6	16,6	20,6	20,7	18,4	18,0	16,6	17,4	18,3	17,9	20,0	22,4	23,2	15,5	11,1	11,7	12,7	11,3	11,1
	$SD^{\pm}$	3,2	3,0	1,3	4,1	2,8	3,7	3,2	2,9	1,8	3,0	4,9	4,5	5,8	5,6	3,5	3,2	2,3	3,5	4,8	4,8	4,0	5,5	6,4	6,1
II.Qu.	N =	6	5	6	6	7	7	8	8	8	7	8	6	6	7	8	8	8	8	5	5	5	3	2	3
V_E (l/min)	MAX	23,1	23,8	19,8	20,2	19,8	22,2	23,1	39,2	35,2	25,7	26,4	22,7	23,3	23,8	25,1	25,3	30,8	30,8	22,0	14,7	14,7	17,6	14,1	13,9
	MIN	7,5	10,1	9,0	9,0	9,5	10,3	7,5	7,0	9,7	9,8	7,9	8,6	8,6	7,9	7,0	8,1	9,2	10,8	11,2	7,9	10,1	7,9	7,9	7,9
	$\bar{X}$	12,6	14,7	13,9	13,3	13,8	14,9	14,4	21,1	21,1	18,4	17,6	16,4	17,0	17,1	17,3	18,8	20,4	22,3	15,7	11,0	12,0	13,2	11,0	9,9
	$SD^{\pm}$	5,7	6,2	4,0	4,1	3,8	4,7	4,6	9,4	8,0	5,7	6,1	5,5	5,6	5,5	6,0	6,1	6,8	6,8	4,3	2,4	2,2	4,9	4,3	3,5
III.Qu.	N=	6	3	3	4	7	8	8	8	8	8	7	7	7	6	8	8	8	8	5	4	4	4	3	3
V_E (l/min)	MAX	18,9	20,2	17,8	14,7	22,0	19,6	29,5	37,8	30,8	29,9	27,7	27,3	26,8	31,9	39,2	37,2	38,5	38,5	19,1	16,5	16,7	16,3	17,4	13,4
	MIN	8,1	9,0	10,6	9,5	11,0	10,6	8,1	14,5	16,1	14,3	15,0	12,8	14,1	9,7	12,1	13,9	13,2	16,9	10,3	13,2	7,7	8,8	7,3	6,8
	$\bar{X}$	15,1	14,5	14,1	12,3	16,3	15,5	16,4	25,3	24,6	23,8	22,1	20,5	20,5	20,3	23,6	23,0	25,1	26,7	15,3	14,7	12,2	11,9	12,5	11,0
	$SD^{\pm}$	4,0	5,6	3,6	2,2	4,7	3,0	6,6	8,5	5,3	6,0	5,0	5,4	4,7	8,0	8,3	7,4	8,4	7,3	3,5	1,6	4,4	3,3	5,1	3,6
SIGNIF. (p)		NICHT SIGNIFIKANT																							

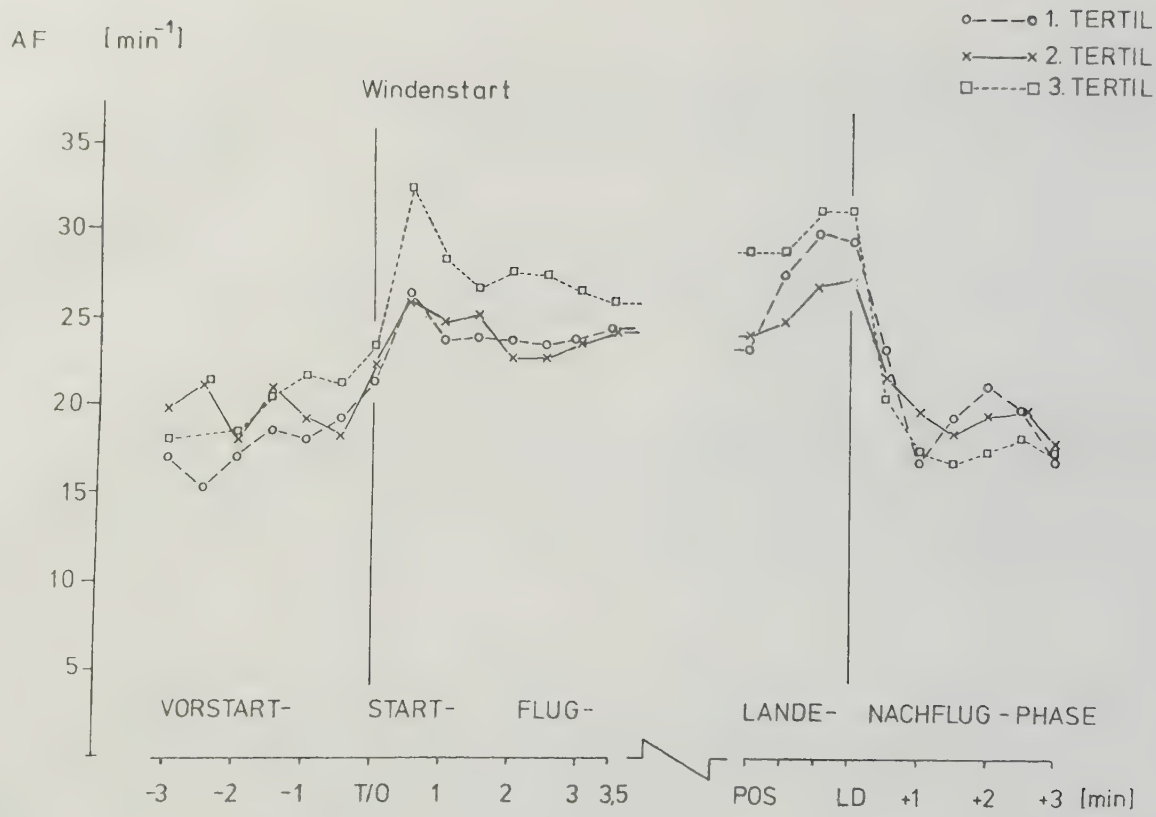


ABB. 11

SEGELFLUG: DARSTELLUNG DER MITTELWERTE DER ATEMFREQUENZ IN ABHÄNGIGKEIT VON DER KARDIO-ZIRKULATORISCHEN LEISTUNGSFÄHIGKEIT. DIE ZUGEHÖRIGEN STANDARDABWEICHUNGEN SIND DER TABELLE 11 ZU ENTNEHMEN.

TABELLE 11: VERHALTEN DER ATEMFREQUENZ BEIM SEGELFLUG IN ABHÄNGIGKEIT VON DER KARDIO-ZIRKULATORISCHEN LEISTUNGSFÄHIGKEIT.

HALBMINUTEN

		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
I. QU.	N =	6	3	4	6	8	8	8	8	8	8	8	8	8	7	8	8	8	8	7	6	5	3	1	3
	MAX	24	16	19	28	26	29	30	36	32	38	34	36	35	38	34	37	42	42	30	26	26	28	20	19
AF	MIN	12	14	14	14	14	14	16	20	18	18	18	18	18	20	18	22	24	24	16	10	16	16	20	16
(min^{-1})	$\bar{x}$	17,0	15,3	17,0	18,5	18,0	19,1	21,3	26,4	23,6	23,9	23,8	23,4	23,8	24,4	23,2	27,6	30,0	29,5	23,3	17,0	19,6	21,3	20,0	17,0
	SD±	3,9	1,2	2,4	4,9	3,5	4,5	4,9	4,7	4,4	6,2	4,8	5,4	5,1	6,8	4,7	5,6	5,9	5,7	4,9	5,3	3,8	6,1	0,0	1,7
II. QU.	N =	7	3	5	5	7	7	8	8	8	8	7	7	7	7	8	8	8	8	5	5	4	3	3	4
	MAX	26	31	25	28	26	26	28	36	34	34	34	30	32	32	30	33	34	36	28	24	26	26	24	24
AF	MIN	14	15	14	17	14	10	17	11	13	14	10	14	14	15	17	16	16	18	16	10	12	13	12	12
(min^{-1})	$\bar{x}$	19,7	21,0	18,0	20,8	19,1	18,1	22,1	25,9	24,8	25,1	22,9	22,9	23,7	24,3	24,1	25,0	27,0	27,3	21,8	19,8	18,5	20,0	20,0	18,0
	SD±	3,7	8,7	4,6	4,3	4,0	5,0	3,6	8,9	7,1	4,7	8,1	5,8	7,0	6,4	5,2	6,1	6,0	6,7	4,5	5,8	6,0	6,5	6,9	5,2
III. QU.	N =	5	3	4	6	7	8	8	8	8	8	8	8	8	5	8	8	8	8	4	4	4	4	3	3
	MAX	26	26	24	26	28	27	40	38	36	34	36	33	36	34	38	39	40	40	28	20	22	20	22	19
AF	MIN	16	18	13	12	16	16	16	26	20	20	18	22	16	18	20	20	24	24	14	14	12	12	14	14
(min^{-1})	$\bar{x}$	18,8	21,3	18,3	20,5	21,7	21,1	23,4	32,3	28,3	26,6	27,8	27,6	26,0	26,0	29,0	29,0	34,3	31,3	20,8	17,5	17,0	17,5	18,3	17,3
	SD±	4,1	4,2	4,8	5,0	4,0	4,0	7,6	5,1	5,2	5,2	6,6	4,7	6,5	6,5	6,1	6,7	6,8	6,8	6,1	3,0	4,8	3,7	4,0	2,9
SIGNIF. (p)		N I C H T S I G N I F I K A N T																							

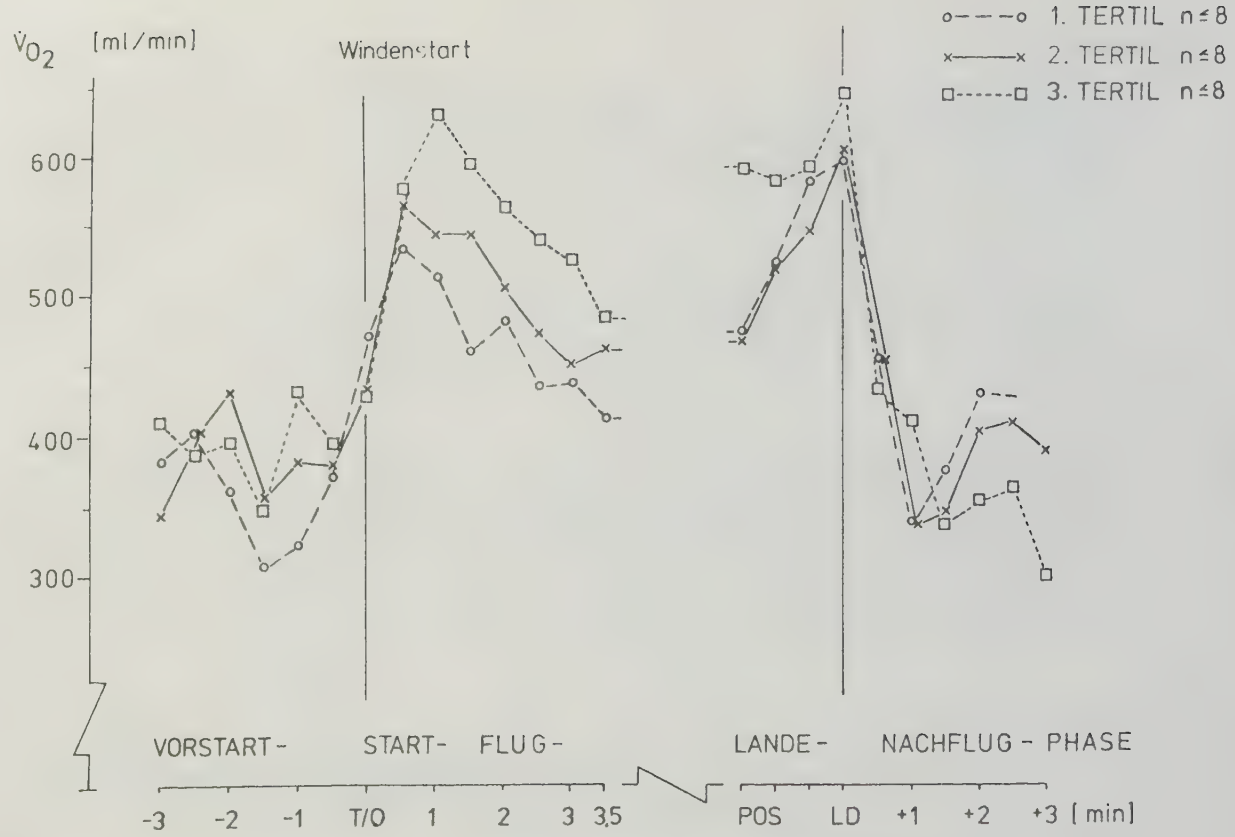


ABB. 12

SEGELFLUG: DARSTELLUNG DER MITTELWERTE DER SAUERSTOFFAUFNAHME IN ABHÄNGIGKEIT VON DER KARDIOZIRKULATORISCHEN LEISTUNGSFÄHIGKEIT. DIE ZUGEHÖRIGEN STANDARD-ABWEICHUNGEN SIND DER TABELLE TABELLE 12A ZU ENTNEHMEN.

TABELLE 12A: VERHALTEN DER SAUERSTOFFAUFNAHME BEIM SEGELFLIEGEN IN ABHÄNGIGKEIT VON DER KARDIOZIRKULATORISCHEN LEISTUNGSFÄHIGKEIT.

HALBMINUTEN

		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
I.Qu.	N=	2	2	3	6	8	8	8	8	8	8	8	7	7	5	8	8	8	8	7	6	4	2	1	--
$\dot{V}_{O_2}$	MAX	388	439	458	388	449	603	580	716	801	758	770	545	606	478	615	677	821	779	734	508	503	471	535	--
	MIN	379	367	304	216	226	217	268	387	401	325	310	325	322	339	392	450	460	463	323	180	259	392	535	--
(ml/min)	X	384	403	361	309	323	372	471	532	513	461	481	436	438	414	475	528	582	597	457	338	375	432	535	--
	SD^{+}_{-}	64	51	84	69	81	115	101	103	127	134	142	83	108	64	90	79	108	97	141	128	107	56	000	--
II.Qu.	N =	3	3	4	5	7	7	8	8	8	7	7	6	6	5	8	8	8	8	5	5	4	3	2	1
$\dot{V}_{O_2}$	MAX	445	445	469	401	486	545	863	839	779	767	683	631	554	531	586	724	718	783	706	412	395	493	433	390
	MIN	360	360	386	258	297	218	284	273	398	402	327	325	245	398	275	368	432	432	310	213	309	275	395	390
(ml/min)	X	403	403	430	357	382	380	434	567	546	546	505	472	449	461	467	524	545	602	456	337	343	407	414	390
	SD^{+}_{-}	43	43	34	59	62	105	188	178	120	125	142	120	117	63	115	112	122	128	160	76	41	116	27	000
III.Qu.	N =	4	3	3	4	6	7	8	8	8	8	7	7	7	5	8	8	8	8	5	4	4	3	2	2
$\dot{V}_{O_2}$	MAX	445	494	443	382	485	467	672	776	823	776	718	708	611	596	787	757	736	736	565	495	435	457	480	370
	MIN	382	267	341	286	331	322	267	346	499	489	493	435	458	319	394	472	449	550	333	317	233	308	248	231
(ml/min)	X	411	390	395	348	429	391	432	579	629	593	563	542	527	483	593	586	597	644	432	413	338	358	364	301
	SD^{+}_{-}	32	115	51	42	56	54	136	162	121	121	84	88	52	104	116	104	95	63	97	93	95	85	164	98
SIGNIF. (p)		NICHT SIGNIF.				<0,05																			

NICHT SIGNIFIKANT

TABELLE 12B: VERHALTEN DER SAUERSTOFFAUFNAHME, BEZOGEN AUF DAS KÖRPERGEWICHT, IN ABHÄNGIGKEIT VON DER KARDIOZIRKULATORISCHEN LEISTUNGSFÄHIGKEIT.

		HALBMINUTEN																							
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
I. QU.	N =	2	2	3	6	8	8	8	8	8	8	8	7	7	5	8	8	8	8	7	6	4	2	1	--
	MAX	5,5	6,7	6,9	5,9	6,8	9,1	9,7	11,7	12,1	11,9	11,7	8,4	9,6	8,4	10,1	10,8	12,4	13,7	11,1	7,7	7,6	7,1	8,1	--
$\dot{V}_{O_2}$/KG	MIN	4,9	5,3	4,4	3,2	3,3	3,1	4,3	5,8	6,1	4,9	4,7	4,9	4,8	5,1	5,7	6,3	6,8	7,3	5,6	3,0	3,8	5,7	8,1	--
	X	5,2	6,0	5,5	4,6	4,9	5,7	7,1	8,1	7,7	7,0	7,2	6,5	6,8	6,4	7,7	8,0	8,8	9,4	7,4	5,1	5,7	6,4	8,1	--
(ml/min·kg)	SD±	0,4	1,0	1,3	1,1	1,4	1,7	1,8	2,0	2,1	2,3	2,2	1,3	2,0	1,4	1,8	1,4	1,8	1,9	1,9	1,9	1,7	1,0	0,0	--
II. QU.	N =	4	2	4	5	7	7	8	8	8	7	7	6	6	5	8	8	8	8	5	5	3	2	1	1
	MAX	5,7	6,1	7,0	6,1	7,3	8,1	12,9	12,5	12,4	12,2	10,8	9,0	9,5	7,8	10,0	11,5	11,2	12,4	11,2	6,1	5,8	7,3	5,8	5,7
$\dot{V}_{O_2}$/KG	MIN	4,1	6,0	5,9	3,6	4,4	3,9	3,7	3,9	5,7	5,7	4,2	3,8	3,5	5,5	3,9	5,3	5,9	6,5	4,3	2,7	4,0	4,4	5,8	5,7
	X	5,0	6,1	6,4	5,2	5,5	5,6	6,2	7,8	7,8	7,7	7,1	6,6	6,3	6,2	7,0	7,6	8,2	8,9	6,5	4,8	5,2	5,9	5,8	5,7
(ml/min·kg)	SD±	0,7	0,1	0,5	1,0	1,0	1,4	3,0	2,9	2,3	2,3	2,5	2,0	1,9	0,9	2,2	2,0	2,2	2,1	2,9	1,3	1,0	2,1	0,0	0,0
III. QU.	N =	4	3	3	4	6	8	8	8	8	8	7	7	7	4	8	8	8	7	5	4	4	3	2	2
	MAX	5,8	6,7	6,4	5,8	7,0	7,1	9,1	11,0	12,5	11,1	9,8	9,0	9,3	10,0	11,8	10,7	11,3	11,3	7,6	7,5	6,6	6,9	7,3	5,6
$\dot{V}_{O_2}$/KG	MIN	4,8	3,3	4,2	3,4	4,0	4,4	4,0	4,7	6,9	6,2	6,4	5,8	5,6	3,9	5,8	6,0	6,3	6,3	4,6	4,5	3,3	4,4	3,7	3,4
	X	5,3	5,1	5,6	4,7	5,8	5,5	5,8	8,4	8,4	7,9	7,6	7,1	7,3	7,1	8,4	8,1	8,4	9,3	6,2	6,1	5,0	5,3	5,5	4,5
(ml/min·kg)	SD±	0,4	1,8	1,2	1,0	1,2	0,8	2,0	2,3	1,9	1,6	1,1	1,1	1,1	2,7	2,0	1,8	1,8	1,6	1,4	1,6	1,4	1,4	2,5	1,6
SIGNIF. (P)		NICHT SIGNIFIKANT																							

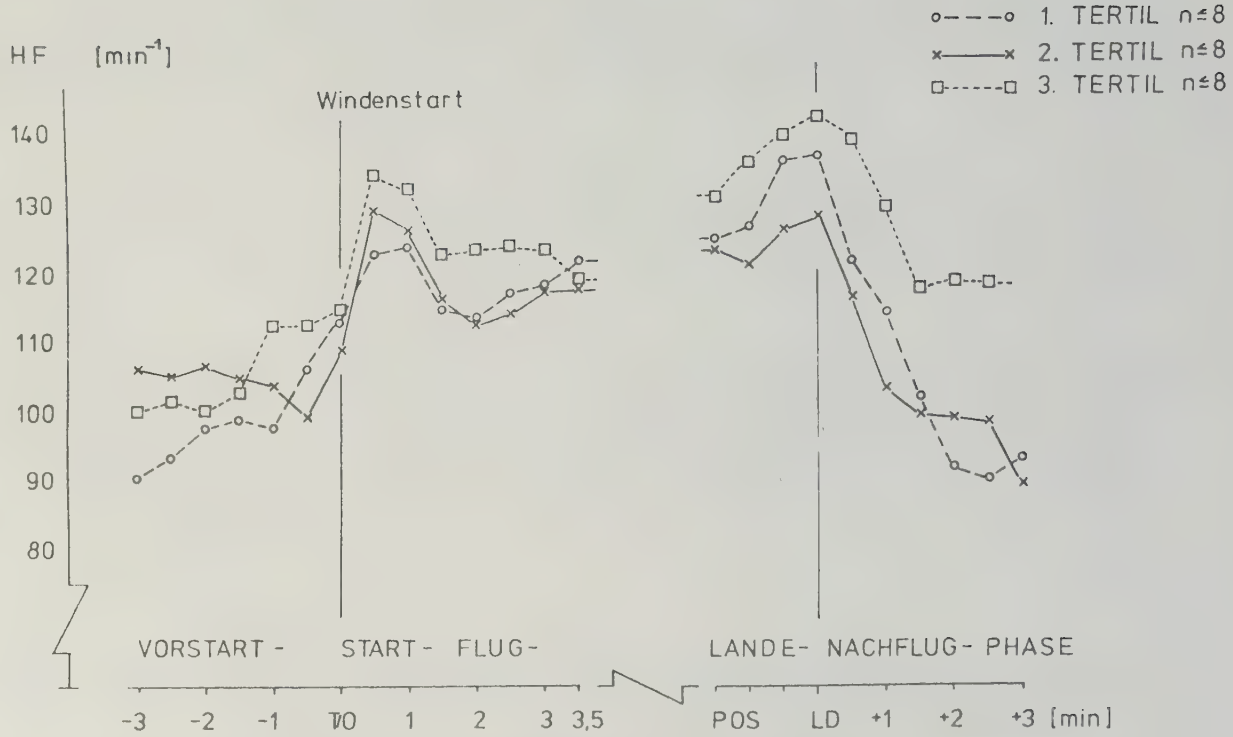


ABB. 13

SEGELFLUG: DARSTELLUNG DER MITTELWERTE DER HERZFREQUENZ IN ABHÄNGIGKEIT VON DER KARDIO-ZIRKULATORISCHEN LEISTUNGSFÄHIGKEIT. DIE ZUGEHÖRIGEN STANDARDABWEICHUNGEN SIND DER TABELLE 13 ZU ENTNEHMEN.

TABELLE 13: VERHALTEN DER HERZFREQUENZ BEIM SEGELFLUG IN ABHÄNGIGKEIT VON DER KARDIO-ZIRKULATORISCHEN LEISTUNGSFÄHIGKEIT.

		HALBMINUTEN																							
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
I.Qu.	N =	4	3	4	7	8	8	8	8	8	8	7	7	7	6	8	8	8	8	8	7	7	3	3	3
	MAX	116	106	121	121	110	124	133	149	160	150	138	138	139	138	136	134	160	159	135	116	112	99	97	97
HF (min^{-1})	MIN	78	83	84	84	89	90	90	100	102	87	88	93	106	108	106	112	112	117	109	79	84	85	84	79
	$\bar{x}$	91	93	98	99	98	107	113	125	123	114	113	117	118	122	125	127	136	137	121	104	101	91	90	90
	SD ±	18	12	18	13	7	11	13	16	17	18	15	14	11	11	9	9	14	13	9	15	11	7	7	96
II.Qu.	N =	4	4	4	5	5	8	8	8	8	8	8	8	7	7	8	8	8	8	7	7	4	4	3	2
	MAX	122	117	118	117	119	113	145	153	161	150	143	153	164	150	146	143	160	161	147	128	104	100	101	90
HF (min^{-1})	MIN	97	94	98	84	88	77	77	100	97	82	74	73	76	85	87	89	88	89	74	68	97	95	95	88
	$\bar{x}$	106	105	107	104	103	98	108	129	125	116	112	114	118	117	120	120	126	128	117	103	399	98	98	89
	SD ±	11	10	8	13	11	12	21	19	23	26	25	26	33	26	20	20	26	26	23	20	3	2	3	1
III. Qu.	N =	7	5	6	6	7	8	8	8	8	8	8	8	8	5	8	8	8	8	6	4	3	2	2	1
	MAX	122	119	117	116	136	136	141	156	161	163	169	167	165	138	160	162	161	161	148	138	131	129	129	128
HF (min^{-1})	MIN	83	83	83	83	95	94	90	111	112	107	98	100	98	104	105	113	121	120	106	118	110	108	107	128
	$\bar{x}$	100	101	100	102	112	113	115	134	132	126	123	123	123	118	131	136	139	142	136	129	117	119	118	128
	SD ±	13	14	13	13	14	14	17	16	16	18	22	22	21	15	21	19	14	16	16	11	12	15	16	00
SIGNIF. (p)		NICHT SIGNIFIKANT																							

ABB. 14

SEGELFLUG: KALORISCHER UMSATZ (BEZOGEN AUF DIE KÖRPEROBERFLÄCHE) BEIM SEGELFLUG IN ABHÄNGIGKEIT VON DER KARDIOZIRKULATORISCHEN LEISTUNGSFÄHIGKEIT. (QU I = ÜBERDURCHSCHNITTLICH TRAINIERTE ,QU II = DURCHSCHNITTLICH TRAINIERTE,QU III = UNTERDURCHSCHNITTLICH TRAINIERTE PROBANDEN). IN ALLEN PHASEN LIEGEN ZWISCHEN DEN QUANTILEN KEINE SIGNIFIKANTEN UNTERSCHIEDE VOR.

TABELLE 14: VERHALTEN DES KALORISCHEN UMSATZES (BEZOGEN AUF DIE KÖRPEROBERFLÄCHE) BEIM SEGELFLUG IN ABHÄNGIGKEIT VON DER KARDIOZIRKULATORISCHEN LEISTUNGS-FÄHIGKEIT.

TRAININGS-ZUSTAND	VORSTART-	N	START-	N	FLUG-	N	LANDE-	N	NACHFLUG-	N
					PHASE					
I.QUANTIL										
(Kcal/min·m²)	0,97±0,17	8	1,36±0,33	8	1,31±0,35	8	1,42±0,27	8	1,12±0,38	8
(KJ /min·m²)	4,07±0,71		5,71±1,37		5,48±1,47		5,95±1,15		4,68±1,58	
II.QUANTIL										
(Kcal/min·m²)	0,99±0,17	8	1,38±0,40	8	1,24±0,36	7	1,44±0,30	8	1,05±0,16	5
(KJ /min·m²)	4,14±0,73		5,78±1,69		5,21±1,51		6,01±1,25		4,39±0,69	
III.QUANTIL										
(Kcal/min·m²)	0,95±0,15	8	1,51±0,28	8	1,30±0,20	7	1,49±0,28	8	1,05±0,27	5
(KJ /min·m²)	3,97±0,65		6,33±1,17		5,44±0,83		6,25±1,17		4,40±1,11	
SIGNIF. (p)	NICHT SIGN.		NICHT SIGN.		NICHT SIGN.		NICHT SIGN.		NICHT SIGN.	

4.2.4 Der Einfluß der Flugerfahrung auf das Verhalten kardiopulmonaler Parameter beim Segelflug

Der Tabelle 15 sind die Merkmale der Gruppen unterschiedlicher Flugerfahrung zu entnehmen; es wird daraus deutlich, daß sich die Gruppen ausschließlich in der Zahl der Starts und Flugstunden signifikant unterschieden.

Tab. 15 Einteilung der 24 Piloten (W) nach der individuellen Flugerfahrung

GRUPPE	N	ALTER (Jahre)	GRÖSSE (cm)	GEWICHT (kg)	AEROBE KAPAZITÄT (ml/min·kg $\dot{V}_{O_2}max$)	GESAMT-FLUGSTD. (h)	GESAMT-STARTS (n)
GR 1 1-25 Flg-Std.	7	25,4 ± 4,4	181,0 ± 3,5	71,6 ± 8,3	44,1 ± 6,7	11,6 ± 9,7	61 ± 40
GR 2 26-250 Flg-Std.	12	25,0 ± 2,2	181,1 ± 6,7	71,2 ± 8,3	44,5 ± 4,7	100,8 ±62,6	295 ±169
GR 3 > 250 Flg-Std.	5	31,5 ± 6,9	181,6 ± 7,4	69,8 ± 6,4	49,1 ± 8,4	680,0 ±305,0	1260 ±706
SIGNIF. (p)		n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	<0,001	<0,001

Bei allen drei Gruppen zeigten sich die charakteristischen Veränderungen der kardiopulmonalen Parameter wie in Absatz 4.2.2 beschrieben. Das Ausmaß der Veränderungen der Meßgrößen dagegen war zwischen den einzelnen Gruppen unterschiedlich.

Sgnifikante Unterschiede bestanden in der Start-, Flug- und Lande-Phase. Als empfindlichster Parameter, um zwischen Pilotengruppen unterschiedlicher Flugerfahrung zu differenzieren, erwies sich die Atemfrequenz: in Gruppe 1 wurden die höchsten, in Gruppe 3 die niedrigsten Atemfrequenzen gemessen; die Unterschiede waren zwischen den drei Gruppen in allen Halbminuten der Start-, Flug- und Lande-Phase signifikant ($p < 0,05$).

Die Sauerstoffaufnahme ($\dot{V}O_2$ und $\dot{V}O_2$/kg) wies zwischen den Gruppen signifikante Unterschiede in den Halbminuten 11 bis 16 und 18 (Flug- und Lande-Phase) auf; auffallenderweise wurden bei den Piloten der Gruppe 2 in den Mittelwerten höhere Werte gemessen als in Gruppe 1.

Demgegenüber ließen die Parameter Atemminutenvolumen und Herzfrequenz eindeutig interpretierbare bzw. signifikante Unterschiede zwischen den Gruppen unterschiedlicher Flugerfahrung nicht erkennen. Es ließ sich lediglich die Tendenz ablesen, daß in allen Minuten der Start-, Flug- und Lande-Phase das mittlere Atemminutenvolumen in der Gruppe 3 niedriger blieb als in den beiden anderen Gruppen.

Beim kalorischen Umsatz waren signifikante Gruppenunterschiede in der Start- und Lande-Phase zu beobachten; Gruppe 2 wies die höchsten, Gruppe 3 die niedrigsten Werte auf.

Über die Meßergebnisse geben die Abbildungen 16 bis 20 und die Tabellen 16 bis 20 Aufschluß.

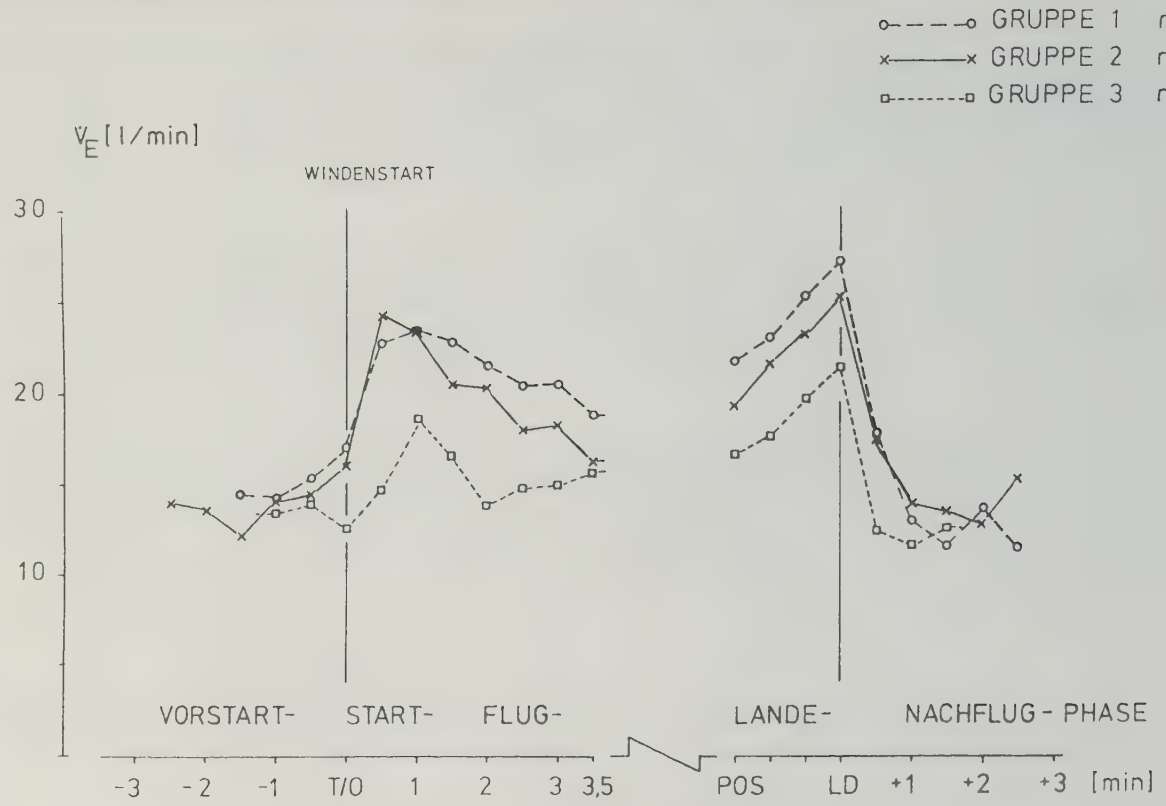


ABB. 16

SEGELFLUG: DARSTELLUNG DER MITTELWERTE DES ATEMMINUTENVOLUMENS IN ABHÄNGIGKEIT VON DER FLUGERFAHRUNG. DIE ZUGEHÖRIGEN STANDARDABWEICHUNGEN SIND DER TABELLE 16 ZU ENTNEHMEN.

TABELLE 16: VERHALTEN DES ATEMMINUTENVOLUMENS BEIM SEGELFLUG IN ABHÄNGIGKEIT VON DER FLUGERFAHRUNG.

HALBMINUTEN

		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
GR. 1																									
$\dot{V}_E$	N =	4	2	2	4	7	7	7	7	7	7	6	6	6	6	7	7	7	7	5	5	4	4	3	3
	MAX	18,9	20,2	17,8	18,9	22,0	19,6	29,5	31,7	30,8	29,9	26,6	25,5	26,8	25,1	29,9	26,8	31,2	31,7	18,3	17,6	15,2	17,8	14,1	13,9
(l/min)	MIN	7,5	10,3	11,2	9,9	8,8	10,3	8,1	14,5	16,1	14,5	14,3	12,8	14,1	13,2	12,8	13,9	13,2	20,0	10,3	5,3	7,7	8,8	7,3	6,8
	$\bar{x}$	12,6	15,3	14,5	13,9	14,0	15,3	17,7	22,8	23,5	22,8	21,4	20,4	20,9	20,5	22,5	21,7	24,2	26,5	15,4	12,9	11,6	13,6	11,4	11,2
	SD ±	5,7	7,0	4,7	3,9	4,7	3,7	6,7	6,2	5,0	5,7	5,3	5,7	5,2	5,6	5,9	5,3	6,0	4,9	3,5	4,6	3,7	4,7	3,6	3,8
GR. 2																									
$\dot{V}_E$	N =	11	9	10	10	11	12	12	12	12	11	12	9	9	8	12	12	12	12	8	7	7	5	3	3
	MAX	23,1	23,8	19,8	20,2	21,8	22,2	23,1	39,2	35,2	28,2	27,7	27,3	25,3	31,9	39,2	37,2	19,9	38,5	22,0	16,5	16,7	16,3	17,4	15,4
(l/min)	MIN	6,6	7,3	9,0	7,5	7,3	6,8	9,9	12,5	13,2	12,3	12,5	12,4	11,0	9,7	12,1	11,2	12,5	14,1	11,2	9,0	8,1	7,9	7,9	7,9
	$\bar{x}$	13,4	13,1	13,1	12,1	13,9	14,5	16,0	24,3	22,8	20,4	20,1	17,9	18,2	19,5	19,9	21,4	38,5	24,9	16,7	9,6	12,6	12,8	13,7	12,2
	SD ±	4,6	5,1	3,3	3,7	4,4	4,3	3,4	8,0	5,9	5,3	5,3	4,9	5,0	7,1	7,1	6,3	51,2	6,4	3,7	6,9	3,2	3,1	5,1	3,9
GR. 3																									
$\dot{V}_E$	N =	1	-	-	3	4	4	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	3	3	3	1	1	2
	MAX	7,7	-	-	14,7	16,3	16,1	17,6	22,7	24,0	20,0	18,5	19,1	21,3	18,7	18,0	22,7	24,0	21,1	17,2	14,1	15,0	6,8	6,8	7,9
(l/min)	MIN	7,7	-	-	7,5	10,1	10,3	7,5	7,0	9,7	9,8	7,9	8,6	8,6	7,9	7,0	8,1	9,2	10,8	6,8	6,8	6,8	6,8	6,8	6,8
	$\bar{x}$	7,7	-	-	12,1	13,6	14,0	12,5	16,7	18,6	16,6	13,8	14,8	15,5	14,6	15,0	17,2	18,4	18,6	12,5	9,6	10,9	6,8	6,8	7,4
	SD ±	0,0	-	-	3,7	2,6	2,6	4,1	6,0	5,4	4,2	3,8	4,3	5,6	4,4	4,6	5,5	5,6	4,4	5,3	3,9	4,1	0,0	0,0	0,8
SIGNIF. (p)		NICHT SIGNIFIKANT											<0,05	NICHT SIGNIFIKANT												

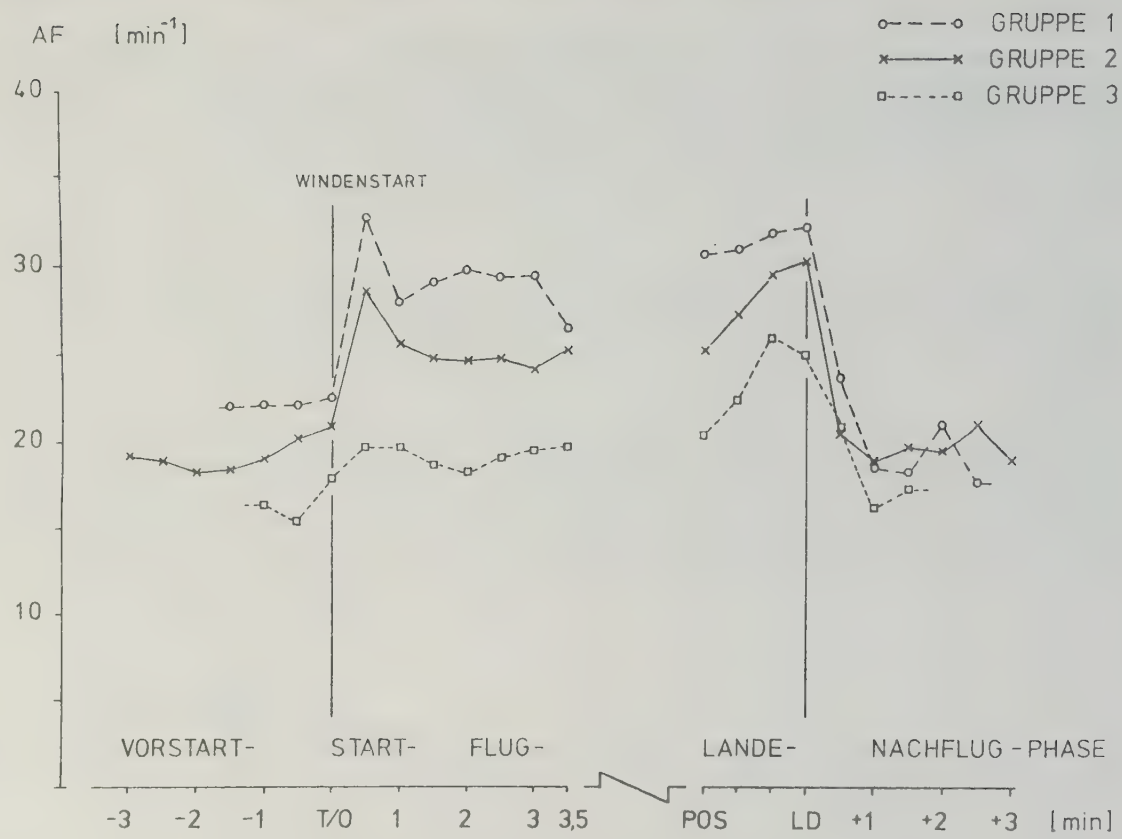


ABB.17

SEGELFLUG: DARSTELLUNG DER MITTELWERTE DER ATEMFREQUENZ IN ABHÄNGIGKEIT VON DER FLUGERFAHRUNG. DIE ZUGEHÖRIGEN STANDARDABWEICHUNGEN SIND DER TABELLE 17 ZU ENTNEHMEN.

TABELLE 17: VERHALTEN DER ATEMFREQUENZ BEIM SEGELFLUG IN ABHÄNGIGKEIT VON DER FLUGERFAHRUNG.

		HALBMINUTEN																							
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
GR. 1	N=	4	1	1	5	7	7	7	7	7	7	7	7	7	6	7	7	7	7	5	5	4	4	3	3
AF (min^{-1})	MAX	26	26	24	28	26	29	40	38	36	38	36	36	36	38	36	38	40	40	30	26	26	28	14	20
	MIN	16	26	24	16	18	18	16	26	18	22	18	22	22	22	23	24	24	24	14	10	12	12	14	14
	$\bar{x}$	19	26	24	22	21,7	22,4	25,1	32,9	29	29,7	29,7	28,9	29,4	29,2	30	29,9	32,1	31,7	24,4	17,2	18	19,8	19	17,7
	SD±	4,8	00	00	4,5	3,1	4,3	7,8	4,5	6,0	5,5	6,0	5,3	5,2	6,5	4,4	5,3	5,2	5,2	6,2	6,1	6,3	6,6	5,0	3,2
GR. 2	N=	11	8	10	11	11	12	12	12	12	12	11	11	11	8	12	12	12	12	7	7	6	5	3	4
AF (min^{-1})	MAX	26	31	25	28	28	26	28	38	34	34	34	33	32	32	38	39	42	42	28	24	26	26	24	24
	MIN	12	14	13	12	14	16	16	18	18	16	18	18	16	17	18	16	16	18	18	14	16	13	20	16
	$\bar{x}$	19	18,4	17,7	19	19,3	19,2	21,5	28,9	25,9	25,3	24,7	24,5	24	24,6	25,2	27,4	29,4	30	21,6	20,1	20	19,6	22	19,5
	SD±	3,9	5,4	3,7	4,7	4,4	3,6	3,9	5,5	4,6	5,5	5,3	4,2	5,6	5,6	5,4	6,7	7,1	7,0	3,5	3,5	3,6	4,6	2,0	3,3
GR. 3	N=	3	-	2	1	4	4	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	4	3	3	1	1	3
AF (min^{-1})	MAX	18	-	16	18	18	20	26	26	24	22	22	22	22	22	22	26	30	28	26	18	20	16	12	16
	MIN	14	-	14	18	14	10	16	11	13	14	10	14	14	15	17	17	22	20	16	10	12	16	12	12
	$\bar{x}$	16	-	15	18	16,5	16	20	19,8	19,8	18,8	18,4	19,2	19,6	19,8	19,8	23	25,6	24,4	20,5	14,7	16	16	12	14,7
	SD±	2,0	-	1,4	0,0	1,9	4,4	3,7	5,8	4,1	3,0	5,0	3,3	3,3	2,9	2,3	3,7	3,3	3,6	5,3	4,2	4,0	0,0	0,0	2,3
SIGNIF. (P)		NICHT SIGNIFIKANT							<0,01	<0,05	<0,01	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,1	<0,1	<0,1	NICHT SIGNIFIKANT				

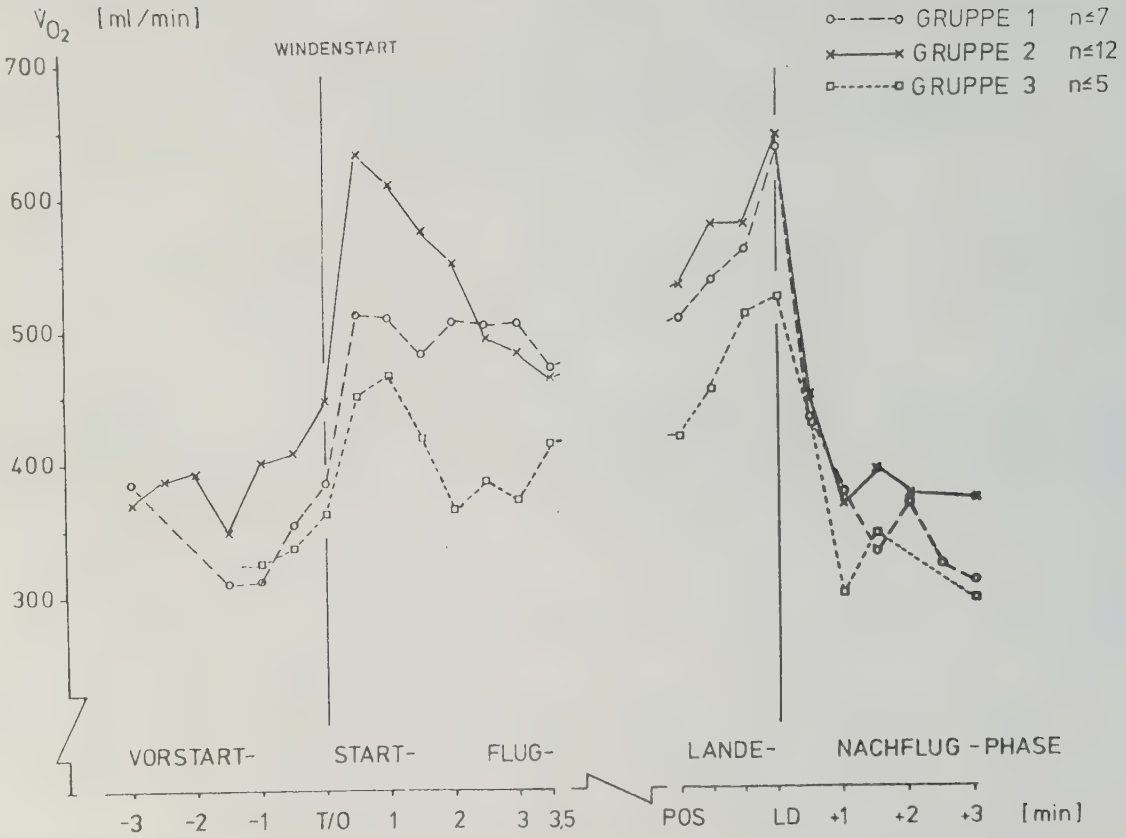


ABB. 18:

SEGELFLUG: DARSTELLUNG DER MITTELWERTE DER SAUERSTOFFAUFNAHME IN ABHÄNGIGKEIT VON DER FLUGERFAHRUNG. DIE ZUGEHÖRIGEN STANDARDABWEICHUNGEN SIND DER TAB. 18A ZU ENTNEHMEN.

TABELLE 18A: VERHALTEN DER SAUERSTOFFAUFNAHME (ABSOLUT) BEIM SEGELFLUG IN ABHÄNGIGKEIT VON DER FLUGERFAHRUNG.

HALBMINUTEN

		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
GR.1	N =	1	1	1	4	6	7	7	7	7	7	6	6	6	4	7	7	7	7	6	5	4	3	2	2
$\dot{V}_{O_2}$	MAX	385	494	443	359	451	455	672	767	728	697	584	590	573	536	697	726	736	736	565	490	395	493	395	390
(ml/min)	MIN	385	494	443	286	282	218	267	346	422	435	435	435	456	422	410	450	449	555	356	180	233	308	248	231
	$\bar{x}$	385	494	443	329	354	359	424	540	541	527	517	516	516	488	564	556	592	645	438	360	309	398	322	311
	SD ±	000	000	000	34	75	76	149	142	98	91	50	57	40	55	85	88	88	57	85	118	68	93	104	112
GR.2	N =	9	7	9	10	11	11	12	12	12	11	11	9	9	4	12	12	12	12	7	7	6	5	3	1
$\dot{V}_{O_2}$	MAX	445	445	469	401	486	603	863	839	823	776	770	708	611	596	787	757	821	783	734	508	503	471	535	370
(ml/min)	MIN	304	267	304	236	226	217	364	421	423	354	400	325	341	319	383	428	442	465	310	287	259	275	433	370
	$\bar{x}$	379	384	394	350	400	410	493	617	616	589	582	517	499	463	533	579	598	640	501	385	378	393	483	370
	SD ±	43	61	60	58	81	107	138	135	139	150	120	116	93	91	118	99	117	100	171	84	88	93	51	000
GR.3	N =	-	-	-	1	4	4	5	5	5	5	5	5	5	4	5	5	5	5	4	3	2	-	-	-
$\dot{V}_{O_2}$	MAX	-	-	-	216	392	387	519	585	535	508	453	467	478	478	493	513	612	615	464	428	418	-	-	-
(ml/min)	MIN	-	-	-	216	255	270	268	273	398	325	310	325	245	339	275	368	432	432	323	213	309	-	-	-
	$\bar{x}$	-	-	-	216	327	337	362	449	464	418	364	385	372	400	388	450	493	509	378	288	364	-	-	-
	SD ±	-	-	-	000	58	51	111	127	68	69	57	57	101	64	78	54	71	71	61	121	77	-	-	-
SIGNIF. (p)		NICHT SIGNIFIKANT																			$<0{,}05$	$<0{,}05$	$<0{,}05$	N.S.	$<0{,}05$

TABELLE 18B: VERHALTEN DER SAUERSTOFFAUFNAHME (GEWICHTSBEZOGEN) BEIM SEGELFLUG IN ABHÄNGIGKEIT VON DER FLUGERFAHRUNG.

HALBMINUTEN

		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
GR. 1	N =	1	1	1	4	6	7	7	7	7	7	6	6	6	4	7	7	7	7	6	5	4	3	2	2
	MAX	5,2	6,7	6,4	5,1	6,1	6,1	9,7	10,4	9,8	9,4	8,6	9,0	9,5	7,8	10,1	10,7	11,3	11,3	7,6	7,3	5,8	7,3	5,8	5,7
$\dot{V}_{O_2}$/KG	MIN	5,2	6,7	6,4	3,4	3,5	3,9	4,0	4,7	6,1	5,9	6,0	6,4	6,3	5,8	5,7	6,3	6,7	8,5	5,4	3,0	3,3	4,6	3,7	3,4
	X	5,2	6,7	6,4	4,5	4,7	5,2	6,2	7,5	7,5	7,4	7,4	7,5	7,9	6,9	8,5	8,1	8,6	9,6	6,4	5,3	4,5	5,9	4,8	4,6
(ml/min·kg)	SD±	0,0	0,0	0,0	0,8	1,1	0,8	2,3	1,9	1,3	1,2	0,9	1,0	1,2	0,8	1,7	1,4	1,6	0,9	1,0	1,6	1,0	1,4	1,5	1,6
GR. 2	N =	9	6	9	10	11	12	12	12	12	11	11	9	9	6	12	12	12	11	7	7	5	4	2	1
	MAX	5,8	6,7	7,0	6,1	7,3	9,1	12,9	12,5	12,5	12,2	11,7	9,0	9,6	10,4	11,8	11,5	12,4	13,7	11,2	7,7	7,6	7,1	8,1	5,6
$\dot{V}_{O_2}$/KG	MIN	4,1	3,3	4,2	3,4	3,3	3,1	4,3	5,3	5,7	5,1	5,0	3,8	4,9	3,9	5,6	6,0	6,1	6,3	4,3	4,2	3,8	4,4	7,3	5,6
	X	5,2	5,6	5,8	5,1	5,8	5,9	6,9	9,2	8,7	8,2	8,2	6,9	6,9	6,6	8,1	8,3	8,9	9,7	7,4	5,7	5,9	5,7	7,7	5,6
(ml/min·kg)	SD±	0,5	1,2	1,0	1,0	1,3	1,6	2,5	2,4	2,4	2,5	2,1	1,7	1,6	2,2	1,9	1,9	2,1	2,2	2,9	1,4	1,4	1,5	0,6	0,0
GR. 3	N =	--	--	--	1	4	4	5	5	5	5	5	5	5	4	5	5	5	5	4	3	2	--	--	--
	MAX	--	--	--	3,2	5,3	5,7	7,9	8,4	8,5	8,1	7,2	6,7	7,6	8,4	7,4	8,1	9,3	9,3	7,8	6,8	6,6	--	--	--
$\dot{V}_{O_2}$/KG	MIN	--	--	--	3,2	4,5	4,8	3,7	3,9	5,7	4,9	4,2	4,9	3,5	5,1	3,9	5,3	5,9	6,5	4,6	2,7	4,0	--	--	--
	X	--	--	--	3,2	4,9	5,1	5,4	6,5	6,8	6,1	5,4	5,6	5,4	6,1	5,7	6,6	7,2	7,5	6,4	4,3	5,3	--	--	--
(ml/min·kg)	SD±	--	--	--	0,0	0,3	0,4	1,8	1,7	1,1	1,2	1,2	0,7	1,5	1,5	1,4	1,2	1,3	1,1	1,5	2,2	1,8	--	--	--
SIGNIF. (p)		NICHT SIGNIFIKANT											<0,05	<0,05	<0,05	N. S.	<0,05	NICHT SIGNIFIKANT							

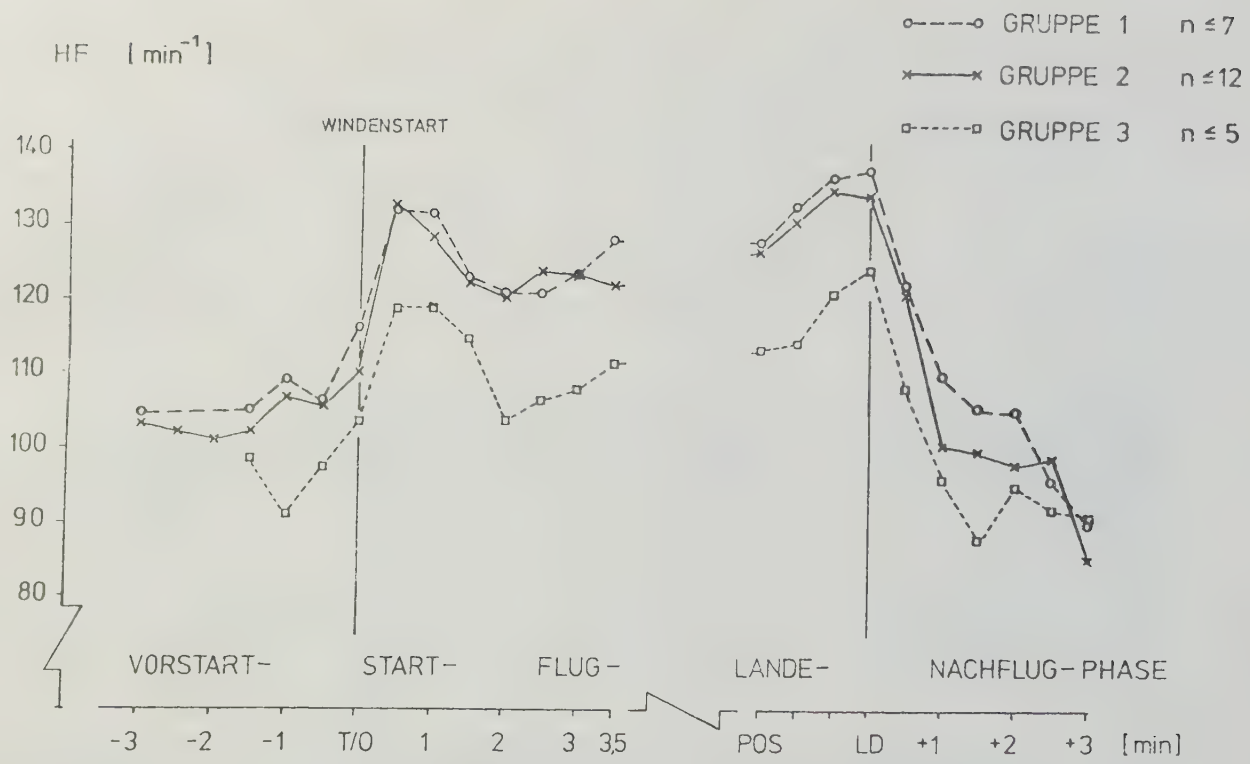


ABB. 19

SEGELFLUG: DARSTELLUNG DER MITTELWERTE DER HERZFREQUENZ IN ABHÄNGIGKEIT VON DER FLUGERFAHRUNG. DIE ZUGEHÖRIGEN STANDARDABWEICHUNGEN SIND DER TABELLE 19 ZU ENTNEHMEN.

TABELLE 19: VERHALTEN DER HERZFREQUENZ BEIM SEGELFLUG IN ABHÄNGIGKEIT VON DER FLUGERFAHRUNG.

HALBMINUTEN

		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
GR.1	N =	5	3	4	5	5	7	7	7	7	7	7	7	7	4	7	7	7	7	7	5	5	3	3	2
HF	MAX	109	112	121	121	119	124	145	150	160	150	138	138	146	143	134	142	148	161	145	121	112	108	107	97
(min^{-1})	MIN	83	83	83	83	95	94	90	108	112	107	106	100	98	104	105	112	112	117	106	105	100	99	95	90
	$\bar{x}$	95	95	102	105	108	109	118	132	131	124	121	121	123	128	124	127	134	140	126	114	107	102	100	94
	$SD^{\pm}$	12	15	18	16	11	12	20	19	17	15	12	14	16	17	11	11	12	15	15	6	6	5	6	5
GR.2	N =	9	9	10	10	11	12	12	12	12	12	11	11	10	9	12	12	12	12	10	9	5	4	3	2
HF	MAX	122	119	118	117	136	136	141	156	161	163	169	167	165	150	160	162	161	161	148	138	131	129	129	128
(min^{-1})	MIN	79	83	84	84	89	84	90	100	99	85	74	73	84	85	98	96	88	89	74	68	91	85	89	94
	$\bar{x}$	104	102	101	102	106	108	111	131	128	121	120	122	123	119	129	132	137	136	125	107	103	102	106	111
	$SD^{\pm}$	14	11	12	10	13	13	13	15	19	22	26	25	26	20	19	19	22	21	23	24	16	19	21	24
GR.3	N =	1	-	-	3	4	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	4	4	4	2	2	2
HF	MAX	78	-	-	109	96	113	117	135	146	132	124	125	134	131	137	136	144	146	125	120	110	98	101	88
(min^{-1})	MIN	78	-	-	84	88	77	77	100	97	82	84	81	76	87	87	89	91	94	109	79	84	88	84	79
	$\bar{x}$	78	-	-	94	92	98	104	119	119	105	103	106	108	111	118	119	126	130	120	108	102	93	93	84
	$SD^{\pm}$	00	-	-	13	3	14	19	16	20	20	17	19	21	16	22	19	21	22	7	19	12	7	12	6
SIGNIF. (p)		N I C H T S I G N I F I K A N T																							

TABELLE 20: KALORISCHER UMSATZ (BEZOGEN AUF DIE KÖRPEROBERFLÄCHE) IN ABHÄNGIGKEIT VON DER FLUGERFAHRUNG. ES SIND DIE MITTELWERTE UND DIE ZUGEHÖRIGEN STANDARDABWEICHUNGEN ANGEGEBEN.

FLUGERFAHRUNG	VORSTART-	N	START-	N	FLUG-	N	LANDE-	N	NACHFLUG-	N	PHASE
GRUPPE 1 (Kcal/min·m²)	0,90±0,12	7	1,32±0,23	7	1,28±0,18	7	1,49±0,20	7	0,98±0,23	6	
(KJ /min·m²)	3,77±0,83		5,51±0,97		5,36±0,74		6,23±0,84		4,12±0,98		
GRUPPE 2 (Kcal/min·m²)	1,04±0,19	12	1,59±0,34	12	1,39±0,36	11	1,54±0,29	12	1,17±0,34	7	
(KJ /min·m²)	4,35±0,77		6,68±1,44		5,81±1,49		6,44±1,22		4,89±1,40		
GRUPPE 3 (Kcal/min·m²)	0,90±0,12	5	1,14±0,15	5	1,07±0,19	5	1,19±o,15	5	0,94±0,17	4	
(KJ /min·m²)	3,78±0,48		4,76±0,78		4,48±0,78		4,97±0,63		3,95±0,70		
SIGNIF. (p)	= 0,11		< 0,025		= 0,15		< 0,05		> 0,3(N.S.)		

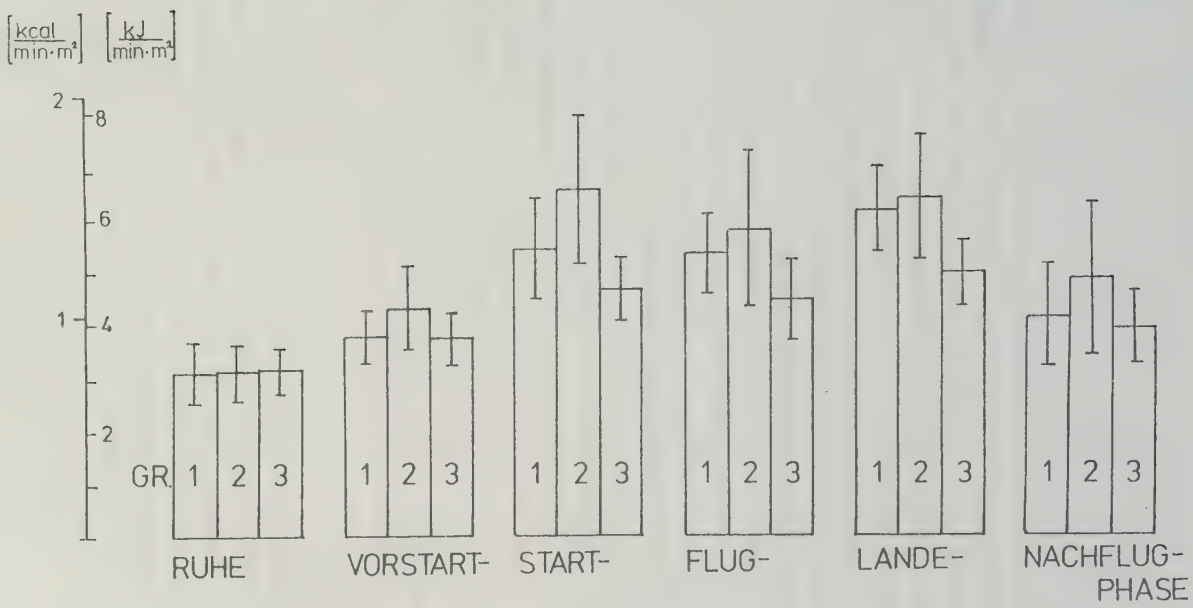


ABB. 20

SEGELFLUG: KALORISCHER UMSATZ (BEZOGEN AUF DIE KÖRPEROBERFLÄCHE) IN ABHÄNGIGKEIT VON DER FLUGERFAHRUNG. (GR1 = PILOTEN BIS 25 STUNDEN, GR2 = PILOTEN BIS 250 STUNDEN, GR3 = PILOTEN ÜBER 250 STUNDEN GESAMTFLUGERFAHRUNG).

IN DER START- UND LANDE-PHASE SIND DIE GRUPPENUNTERSCHIEDE SIGNIFIKANT, IN DER VORSTART- UND FLUG-PHASE ALS TENDENZ ZU DEUTEN.

5. DISKUSSION

5.1 Diskussion der Methode

5.1.1 Probanden

Die Teilnahme am Versuch war freiwillig; eine Selektion nach fliegerischer Ausbildung oder nach körperlichen Kriterien fand nicht statt. Durch die eingehende klinische Untersuchung war gewährleistet, daß alle Probanden zum Zeitpunkt der fliegerischen Untersuchung keine Erkrankungen aufwiesen. Beurteilt nach der Flugerfahrung repräsentiert das Kollektiv annähernd die Struktur eines Segelflugvereins. Vom Lebensalter her handelt es sich bei den untersuchten Piloten um eine relativ junge Gruppe; kein Pilot war älter als 42 Jahre.

Die Piloten geringster Flugerfahrung waren mit dem verwendeten Flugzeugtyp (Schulflugzeug) vertraut und hatten zum großen Teil bisher nur dieses Flugzeug geflogen. Die Piloten mittlerer Flugerfahrung waren zwar aufgrund ihrer Fortschritte auf anderen, leistungsfähigeren Flugzeugtypen "eingeflogen", hatten aber keine Schwierigkeiten beim Fliegen des Meßflugzeuges.

Das Mitfliegen eines Sicherheitspiloten auf dem hinteren Flugzeugsitz dürfte einen gewissen situativen Einfluß genommen haben. Die Flugschüler waren es gewohnt, mit einem Fluglehrer zu fliegen; in diesem Fall ist es nicht ausgeschlossen, daß das Sicherheitsgefühl dadurch gesteigert wurde. Bei den hocherfahrenen Piloten, teils als Fluglehrer tätig, ließ das Selbstbewußtsein des fliegerischen Könnens die Anwesenheit einer mitfliegenden Person als nicht störend empfinden. Lediglich von einigen Piloten durchschnittlicher Flugerfahrung wurde auf Befragen das Mitfliegen des Sicherheitspiloten als irritierend empfunden.

5.1.2 Flugprotokoll

Es wurden Platzrundenflüge durchgeführt, wie sie bei Schulflügen üblich sind. Das besondere Augenmerk der Untersuchung galt den als Belastungsspitzen vermuteten Phasen Start und Landung. Die Ergebnisse der vorliegenden Untersuchung beleuchten damit nur einen Teil der Belastungen im Segelflug. Über das Verhalten kardialer und respiratorischer Parameter unter den Bedingungen von Thermikflügen, unter langzeitiger und einseitiger Belastung, läßt die vorliegende Arbeit keine Aussagen zu.

5.1.3 Störgrößen im Feldversuch

Dem Feldversuch (fliegerische Untersuchung) lag das Bestreben zugrunde, durch einen protokollierten Versuchsablauf gewisse standardisierte Bedingungen aufrechtzuerhalten. Situative Einflüsse waren dennoch nicht vermeidbar. Zum einen erfolgten die Meßflüge im Rahmen des normalen Flugbetriebes auf den betreffenden Segelfluggeländen, so daß in der Vorstart- und Nachflug-Phase aus Gründen der Flugsicherheit wiederholt die geplanten 3-minütigen Beobachtungsphasen nicht eingehalten werden konnten. Die Wetterbedingungen an den Versuchstagen waren unterschiedlich; der Temperaturbereich lag zwischen 16^{o} und 26^{o} Celsius. Die Start- und Landebedingungen waren durch Windeinfluß wechselnd, allerdings waren die Bedingungen an keinem Tag als schwierig zu bezeichnen.

Der zeitliche Ablauf der Versuchsflüge dehnte sich zumeist über den ganzen Tag aus; die Einflüsse der circadianen Rhythmik (116,119) auf die Meßergebnisse waren nicht zu erfassen oder auszuschließen.

5.1.4 Meßwertaufnahme und Datengewinnung

In der vorliegenden Arbeit wurde erstmals versucht, kontinuierlich Messungen spirometrischer Parameter von Piloten während der fliegerischen Tätigkeit vorzunehmen. Der Einbau der zur Verfügung stehenden Geräte (OXYCON P, Telemetriegeräte) in das Flugzeug warf aufgrund der geringen Abmessungen keine wesentlichen Schwierigkeiten auf.

Der Einsatz des OXYON P erforderte die Lösung methodischer Probleme.

Die Messung der ventilierten Volumina konnte aufgrund von Eichungen als hinreichend genau angenommen werden; es waren lediglich die Ausdehnungskoeffizienten für die vorherrschenden Luftdruck- und Temperaturbedingungen zu berücksichtigen und die Meßwerte, wie eingangs beschrieben, zu korrigieren. Der methodische Fehler ist im ungünstigsten Fall auf $\leq 5\%$ zu schätzen.

Eine Erhöhung des Atemwegwiderstands durch das Spirometersystem war nach subjektiver Beurteilung der Versuchspersonen nicht gegeben.

Über den Einsatz der im OXYCON P verwendeten Sauerstoffmeßzelle (s. Abschnitt 3.2.1) unter Bedingungen rasch wechselnden atmosphärischen Drucks, wie dies im Flugzeug bei Änderung der Flughöhe auftritt, waren keine Informationen verfügbar. Die im Rahmen der Untersuchung durchgeführten "Eichflüge" in der Unterdruckkammer und im Segelflug ließen aber eine strenge Abhängigkeit vom O_2-Partialdruck erkennen (Abb. 4). Es wurde deswegen eine Höhenkorrektur-Methode entwickelt, die sich auf relativ genaue Angaben der Flughöhe und Höhenänderung pro Zeiteinheit stützte. Der methodische Fehler dieser Korrektur ist auf $\leq$ 3 mbar /30 sec zu schätzen.

Die Eichversuche in der Unterdruckkammer lieferten darüber hinaus wertvolle Hinweise zur Antwortzeit der Sauerstoffmeßzelle; die von KISSEN (60) angegebene Antwortzeit von 6 bis 10 Sekunden entspricht den eigenen Feststellungen. Längere Antwortzeiten, wie sie von EGER (34) angegeben wurden, sind durch volumenabhängige Verzögerungen in der Durchmischung der Gasprobe erklärbar.
Der gesamte Fehler von Methode und Auswertung der Sauerstoffaufnahme-Messung ist im ungünstigsten Fall mit ≤ 10% zu schätzen.
Die Erfassung und Auswertung der Herzfrequenz ergab keine methodischen Schwierigkeiten. Die über 30 Sekunden integrierten Herzfrequenzen beinhalten insofern einen Informationsmangel, als kurzzeitige Frequenzsteigerungen im Sinne einer "beat-to-beat"-Analyse nicht berücksichtigt wurden (85).
Die Auswertung der Atemfrequenz aus den Aufzeichnungen (s. Abb. 2) warf keine methodischen Schwierigkeiten auf. Wie bei der Herzfrequenz wurden allerdings kurzfristige Änderungen des Atemzyklus nicht erfaßt, gingen aber in die Halbminuten-Integration ein.

5.1.5 Sensitivität der Parameter

Für rein körperliche Arbeit sind die funktionellen Zusammenhänge der kardiopulmonalen Parameter, die in der vorliegenden Arbeit verwendet wurden, weitgehend bekannt (29,50,51,77). Die Eignung (Selektivität) und Empfindlichkeit (Sensitivität) der Parameter, Größenordnung und Zeitverlauf einer psychischen bzw. psychophysischen Belastung zu erfassen, ist durch zahlreiche flugmedizinische Untersuchungen nur für die Atem- und Herzfrequenz belegt (5,10,31,35,58,61,66,84,95,96,97,99,102, 103), obgleich die Eignung der Atemfrequenz als Indikator für rein psychische Belastung nicht unbestritten ist (75).
Über das Atemminutenvolumen als Streßparameter bei fliegerischer Belastung ist nur im Zusammenhang mit Fragestellungen der Hyperventilation berichtet worden (42,81). Die Ergebnisse von MURPHY und YOUNG (81), die kontinuierlich die exspiratorischen Atemvolumina von Piloten während des Fluges registrierten, demonstrieren aber, daß das Atemminutenvolumen geeignet ist, spezifischen fliegerischen Situationen von mindestens einer Minute Dauer mit einer korrelierenden Einstellreaktion zu folgen.
Die Zeitkonstante, die der Einstellzeit von einem Ausgangswert zu einem neuen Stellwert entspricht, ist für die hier untersuchten Meßgrößen unterschiedlich. Die Herzfrequenz spricht auf einen Reiz, gleichgültig ob psychische Belastung oder körperliche Arbeit, unmittelbar und ohne Zeitverzögerung an (18,26,85,87); die Zeitkonstante t wird mit 0,8 min. (18), t/2 mit 27 sec. (87) angegeben. Für die

Atemfrequenz gilt ein um wenige Sekunden verzögertes initiales Ansprechen (26,87). Die Zeitkonstante t liegt bei körperlicher Belastung bei 18 sec. (87). Für psychische Belastungen sind keine Untersuchungen der AF-Kinetik bekannt. Die initiale Reaktion des Atemminutenvolumens erfolgt mit einer Verzögerung von 5 bis 20 Sekunden (26,87) in Abhängigkeit von individuellen Bedingungen wie Trainingszustand und Alter (26), wobei metabolische Steuerungsmechanismen (18) und zentralnervöse Abläufe (26) diskutiert werden. Die Zeitkonstante t ist für $\dot{V}_E$ mit ca. 1,4 min. nur wenig höher als für AF und HF.

Für die Sauerstoffaufnahme liegen nur Ergebnisse bei körperlicher Belastung vor. Die initiale Zeitverzögerung ist dort ähnlich gering wie bei der Herzfrequenz, die Ansprechbarkeit damit rascher als beim Atemminutenvolumen (18,87,120,121). Die Zeitkonstante t wird mit 49 sec (= 0,8 min) gleich der Herzfrequenz angegeben (18), t/2 liegt bei 27 bis 30 sec (19,87).

In der vorliegenden Arbeit sind die Veränderungen der untersuchten Parameter deutlich identifizierbar und den einzelnen fliegerischen Situationen zuordnungsfähig. Dies erlaubt den Schluß, daß die Sensitivität aller Parameter ausreichend war, die psychophysischen Belastungen beim Segelfliegen zu verfolgen.

Hinsichtlich der Zeitkonstanten der einzelnen Parameter erscheint die Auswertung und Darstellung in Halbminutenintervallen gerechtfertigt. Lediglich für den kalorischen Umsatz wurden für jede Flugphase Mittelwerte aus allen zugehörigen Halbminuten gebildet.

5.1.6 Meßtechnische Hinweise

Da die Ermittlung der Sauerstoffaufnahme von der Meßtechnik wie auch von der Auswertung her recht aufwendig ist, wurde untersucht, ob sich die Sauerstoffaufnahme über die Messung der Parameter Herzfrequenz, Atemminutenvolumen und Atemfrequenz annähernd genau vorhersagen läßt. Alle drei Parameter sind vergleichsweise einfach zu messen; die Meßwertaufnahme ist darüber hinaus bei längeren Flügen nicht mit Problemen der Eichung behaftet, wie dies für die Meßwertaufnahme von ΔO_2 mittels der polarographischen Meßzelle anzunehmen ist.

Mit der Sauerstoffaufnahme als abhängige Variable und Atemfrequenz sowie Herzfrequenz als unabhängige Variablen wurde die lineare Mehrfachregressions - gleichung ermittelt:

$$z = 10{,}96x + 2{,}65y - 94{,}37 \qquad (R^2 = 0{,}89)$$

Hierbei ist $z = \dot{V}O_2$, x = AF und y = HF.

Die lineare Mehrfachregression mit der Sauerstoffaufnahme als abhängige Variable und Atemminutenvolumen sowie Atemfrequenz als unabhängige Variablen ergab eine noch engere Korrelation:

$$z = 15{,}43x + 3{,}49y + 117{,}50 \quad (R^2 = 0{,}93)$$

Hierbei ist $z = \dot{V}O_2$, $x = \dot{V}_E$ und $y = AF$.

Unter der Annahme, daß bei der psychophysischen Belastung des Segelfliegens die charakteristische Regulation der kardiopulmonalen Parameter, wie nachfolgend in Absatz 5.2 beschrieben, auch bei längeren Flügen erhalten bleibt, können beide genannten Regressionsgleichungen für eine angenäherte Ermittlung der Sauerstoffaufnahme Verwendung finden. Hierbei eignen sich die respiratorischen Parameter besser als die Herzfrequenz, bei der die großen interindividuellen Streuungen zu beachten sind.

5.2 Die kardiopulmonale Regulation während des Segelfluges

Anhand der Meßdaten der 24 Probanden mit Windenstart wurde die Regulation der kardialen und respiratorischen Meßgrößen näher untersucht.
Hierfür wurde zunächst überprüft, ob alle gemessenen Parameter, wie bei rein körperlicher Arbeit, auch bei der psychophysischen Belastung des Fliegens untereinander korrelieren. Die Korrelationen (Tab. 21) berücksichtigten die gesamte Aufgabe des Fliegens, d.h. von der relativ niedrigen Belastung in der Vorstart- und Nachflug-Phase bis zur relativ hohen Belastung in der Start- und Lande-Phase.
In den Mittelwerten aller 24 Halbminuten weisen die Parameter enge Beziehungen untereinander auf (Tab. 21, Abb. 21).

Die hohen Korrelationskoeffizienten verdeutlichen einerseits, daß die Veränderungen der Parameter flugphasen-spezifisch gleichgerichtet sind (positive Steigung der Regressionsgleichungen); einzig die in-/exspiratorische Sauerstoffdifferenz (ΔO_2) ist den Veränderungen des Atemminutenvolumens gegengleich gerichtet.
Andererseits bestätigen die hohen Korrelationskoeffizienten die in Abschnitt 5.1.5 untersuchte Sensitivität und Ansprechbarkeit der Parameter $\dot{V}_E$, AF, $\dot{V}O_2$ und HF.
Aus dem korrelativen Verhalten der gemessenen Parameter kann auf die kardiopulmonale Regulation beim Fliegen geschlossen werden:

Die Steigerung des Atemminutenvolumens wird von einer diskreten Abnahme der in-/exspiratorischen Sauerstoffdifferenz begleitet; dabei bleibt diese über den ganzen Beobachtungszeitraum nur gering beeinflußt. Die deutliche Steigerung der Sauerstoffaufnahme wird somit aus dem gesteigerten Atemminutenvolumen, nicht aber über eine vermehrte Sauerstoffausschöpfung der Atemluft gewonnen, wie dies bei körperlicher Arbeit der Fall ist. Die Steigerung des Atemminutenvolumens erfolgt in enger Abhängigkeit von der Erhöhung der Atemfrequenz, wobei das Atemzugvolumen praktisch unverändert bleibt.

Die Steigerung der einzelnen Parameter ist, gemessen an den Ruhe- und Maximalwerten (Labor), in den einzelnen Flugphasen von unterschiedlichem Ausmaß. Die prozentualen Anstiege der Werte für $\dot{V}_E$, $\dot{V}O_2$ und HF während des Fliegens im Vergleich zu Ruhe (Labor) sind in Abb. 8 dargestellt worden. Es ist dabei zu berücksichtigen, daß $\dot{V}_E$ und $\dot{V}O_2$ von Ruhe- zu Maximalwerten ein ungefähres Vielfaches um den Faktor 12, Herzfrequenz und Atemfrequenz etwa um den Faktor 3 erreichen. Tabelle 22 zeigt, auf welchen Prozentsatz der durchschnittlichen Maximalwerte (n=24) die kardiopulmonalen Meßgrößen während der einzelnen Flugphasen gesteigert werden. Es ist hervorzuheben, daß sich Atem- und Herzfrequenz während der Belastungsspitzen Start und Landung deutlich mehr den Maximalwerten nähern als Atemminutenvolumen und Sauerstoffaufnahme.

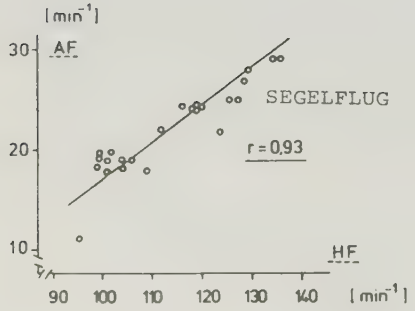
Von der Größenordnung der Sauerstoffaufnahme her entspricht hiernach das Fliegen eines Segelflugzeuges einer körperlichen Arbeit, die weniger als 20% der maximalen Sauerstoffaufnahme erfordert. Die effektive körperliche Arbeit ist damit niedriger als eine Fahrradergometerarbeit von 50 Watt für 2 Minuten.

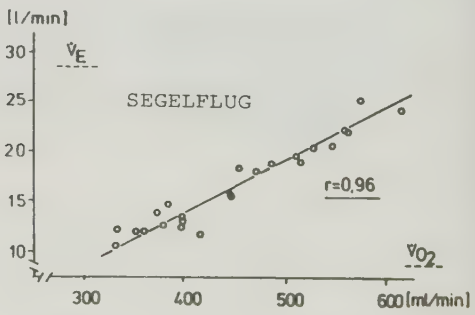
Tabelle 23 zeigt aber, daß die Sauerstoffaufnahme beim Fliegen von bedeutend höheren $\dot{V}_E$-, AF- und HF-Werten begleitet wird als bei einer 50-Watt-Ergometerbelastung am Ende der 2. Belastungsminute.

Die unterschiedlichen Verhältnisse in der Kreislauf- und Atemregulation unter der psychophysischen Belastung des Fliegens bzw. während einer rein körperlichen Belastung sind in Abbildungen 22 bis 24 dargestellt. Als Parameter sind Atemminutenvolumen (Abb. 22), Atemfrequenz (Abb. 23) und Herzfrequenz (Abb. 24) gegenüber der relativen Sauerstoffaufnahme aufgetragen; die Mittelwerte (n=24) von Vorstart- und Start-Phase gegenüber Ruhe (Labor) und niedriger körperlicher Belastung (2 min 50 Watt) bilden die Eckdaten für die gekennzeichneten Bereiche unterschiedlicher Atem- und Kreislaufregulationen.

TABELLE 21: KORRELATIONEN ALLER GEMESSENEN KARDIOPULMONALEN MESSGRÖSSEN UNTEREINANDER (SEGELFLUG)

Parameter x : y	Korrel.-Koeffiz. r	Lin. Regression y = ax + b
AF : HF	0,93	y = 2,62x + 55,30
$\dot{V}_E$: AF	0,95	y = 0,96x + 6,40
$\dot{V}_E$: ΔO_2	0,86	y = -0,02x + 3,70
$\dot{V}_E$: $\dot{V}_{O_2}$	0,95	y = 20,02x + 49,68
AF : $\dot{V}_{O_2}$	0,90	y = 15,28x + 77,33
HF : $\dot{V}_{O_2}$	0,89	y = 5,74x -185,90





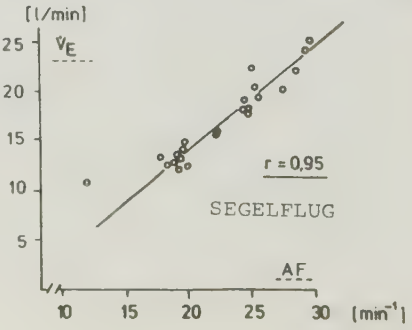


ABB. 21: DARSTELLUNG DER KORRELATIONEN VON ATEMFREQUENZ (AF), HERZFREQUENZ (HF), ATEMMINUTENVOLUMEN ($\dot{V}_E$) UND SAUERSTOFFAUFNAHME ($\dot{V}_{O_2}$) UNTEREINANDER. (Mittelwerte; jeder Datenpunkt entspricht $\bar{x}$ der einzelnen Halbminuten)

TABELLE 22: HÖHE DER KARDIOPULMONALEN MESSWERTE IN DER START- UND LANDE-PHASE, SOWIE IN RUHE (LABOR) UND NACH 50-WATT-ERGOMETERARBEIT, AUSGEDRÜCKT IN % DER INDIVIDUELLEN MAXIMALWERTE.

	$\dot{V}_{O_2}$	$\dot{V}_E$	AF	HF
	(ml/min)	(l/min)	(min^{-1})	(min^{-1})
$MAX_{absol.}$				
$\bar{x}$	3189	111,8	43,6	185,9
SD	± 308	± 9,9	± 4,6	± 6,6
	%	%	%	%
Start % von max	17,5	19,9	64,4	69,4
Landung % von max	19,3	21,6	67,2	73,2
Ruhe (Lab,) %von max	9,2	8,6	34,2	38,9
Ergometrie 2min. 50 W	24,3	17,8	44,3	73,2

TABELLE 23: GEGENÜBERSTELLUNG DER MITTLEREN KARDIOPULMONALEN MESSWERTE DER START- BZW. LANDE-PHASE UND DER SUBMAXIMALEN ERGOMETERBELASTUNG VON 50 WATT ÜBER 2 MINUTEN.

Belastung	$\dot{V}_{O_2}$ (ml/min)	$\dot{V}_E$ (l/min)	AF (min^{-1})	HF (min^{-1})
Start (W) n = 24	559 ±146	22,3 ± 7,5	28,1 ± 6,9	129 ± 17
Landung (W) n = 24	614 ± 98	±24,1 ± 6,1	±29,3 ± 6,3	±136 ± 19
Ergometrie 2min. 50 W	776 ±250	19,9 ± 5,0	19,3 ± 4,3	106 ± 15

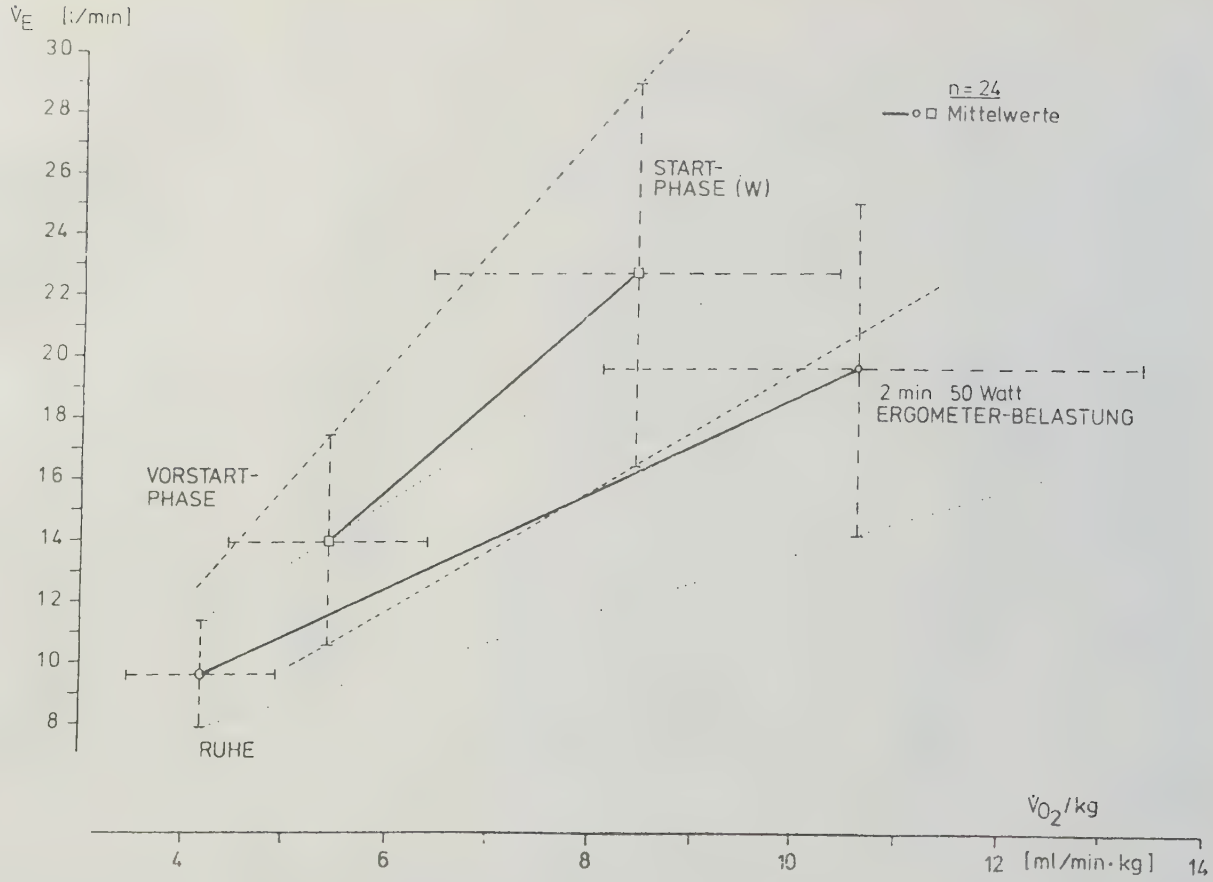


ABB. 22: DIE PSYCHOPHYSISCHE BELASTUNG IN DER START-PHASE (WINDENSTART; OBERE LINIE) FÜHRT TROTZ DER GERINGEREN SAUERSTOFFAUFNAHME ($\dot{V}_{O_2}$/KG) ZU DEUTLICH HÖHEREM ATEMMINUTENVOLUMEN ($\dot{V}_E$), VERGLICHEN MIT DER REIN KÖRPERLICHEN BELASTUNG DER ERGOMETRIE (50 WATT; UNTERE LINIE).

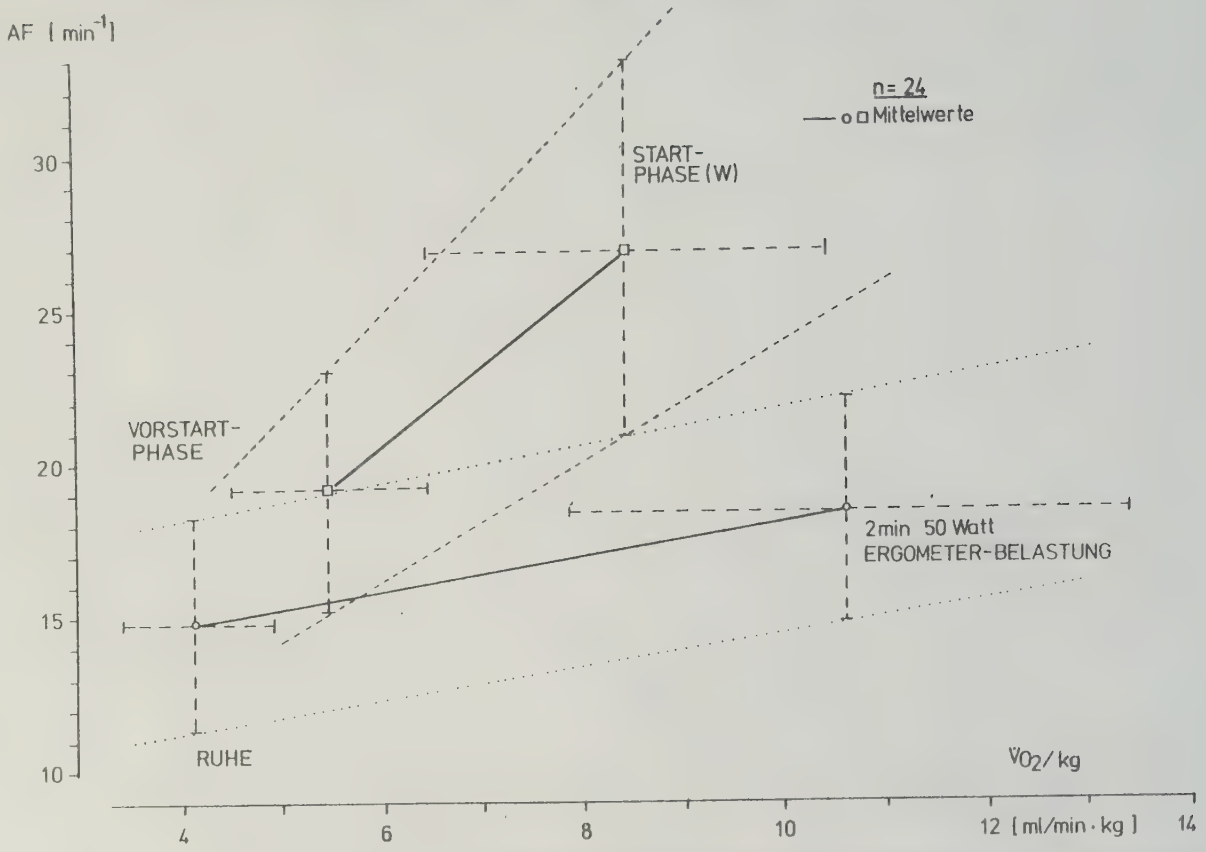


ABB. 23: DIE PSYCHOPHYSISCHE BELASTUNG IN DER START-PHASE (WINDENSTART; OBERE LINIE) FÜHRT TROTZ DER GERINGEREN SAUERSTOFFAUFNAHME ($\dot{V}_{O2}$/KG) ZU DEUTLICH HÖHERER ATEMFREQUENZ (AF), VERGLICHEN MIT DER REIN KÖRPERLICHEN BELASTUNG DER ERGOMETRIE (50 WATT; UNTERE LINIE).

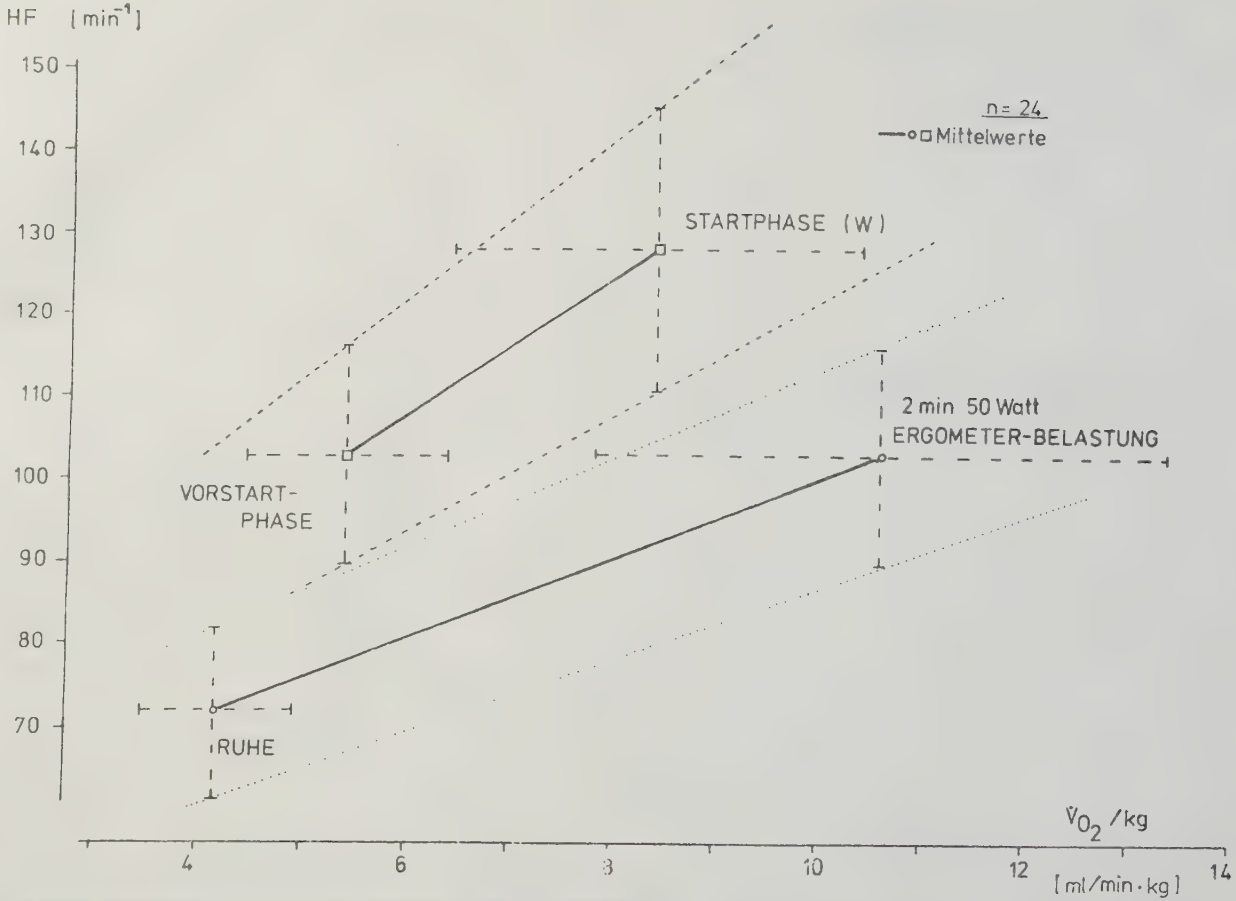


ABB. 24: DIE PSYCHOPHYSISCHE BELASTUNG IN DER START-PHASE (WINDENSTART; OBERE LINIE) FÜHRT TROTZ DER GERINGEREN SAUERSTOFFAUFNAHME ($\dot{V}_{O2}$/KG) ZU DEUTLICH HÖHERER HERZFREQUENZ (HF), VERGLICHEN MIT DER REIN KÖRPERLICHEN BELASTUNG DER ERGOMETRIE (50 WATT; UNTERE LINIE).

So wird in der Start-Phase eine Überhöhung der Herzfrequenz im Mittel um 40 Schläge/min über jenen Wert hinaus erreicht, der nach der Sauerstoffaufnahme einer gleichgroßen körperlichen Belastung entspricht. Die Überhöhung des Atemminutenvolumens beim Start beträgt im Mittel 7 l/min, die der Atemfrequenz 17/min.
Die deutliche "Übersteuerung" von Ventilation ($\dot{V}_E$ und AF) und Herzfrequenz über das für die physikalische Arbeit im Flugzeug notwendige Maß (siehe Abschnitt 4.2.1) hinaus ist der psychischen und mentalen Belastung des Piloten zuzuordnen.
Somit wird die ökonomische Atem- und Kreislaufregulation, die sich beim Übergang von Ruhe zu körperlicher Arbeit niedriger Intensität einstellt (27,30), bei der psychophysischen Belastung des Segelfliegens nicht erreicht.

5.3 Allgemeine und flugbezogene Interpretation der Ergebnisse

In den Ergebnissen der vorliegenden Arbeit spiegelt sich die psychophysische Belastung wider, der der Segelflugpilot bei kurzzeitigen Flügen ausgesetzt ist. Das Verhalten der einzelnen Parameter wie auch die absoluten Größen der Daten lassen die Abstufung in Flugphasen unterschiedlich hoher psychophysischer Belastung für den Piloten zu. Die herausragenden Steigerungen der Meßwerte gegenüber Ruhe (Labor) identifizieren Start und Landung als Belastungsspitzen des Fliegens; die Landung bezeichnet dabei einen geringfügig höheren Streß als der Start. Aber auch die Vorstart- und Nachflug-Phase lassen deutliche Streßreaktionen in der kardiopulmonalen Dimension erkennen. Die reine Flug-Phase belastet den Piloten erkennbar weniger als Start und Landung, aber auch deutlich mehr als die Vorstart-Phase.
Die Meßergebnisse entsprechen im wesentlichen den Erwartungen, da sich für die einzelnen Flugphasen die Komplexität der fliegerischen Aufgabe abgestuft darstellen läßt, aber auch psychische Komponenten diskutiert werden können.
Für die beiden Startarten W und F ist die Vorstart-Phase als ähnlich zu beschreiben. Sie beinhaltet die Kontrolle der Instrumente, der Steuerelemente (Steuerknüppel, Bremsklappenhebel und Seitenruderpedale) sowie das Einklinken des Schleppseils in die Schleppkupplung.Die körperliche Belastung ist, wie die Sauerstoffaufnahme zeigt, gering; die Abläufe erfordern jedoch die volle Aufmerksamkeit des Piloten. Die psychische Komponente, im wesentlichen als Erwartungsspannung zu bezeichnen, ist zum Start hin zunehmend. In der letzten Halbminute vor dem Start, in der das Schleppseil durch langsamen Windenzug bzw. durch Anrollen des Schleppflugzeuges gestrafft wird, leiten Erwartungsspannung und erhöhte Aufmerksamkeit die steilen Anstiege der kardiopulmonalen Parameter ein, die beim Start beobachtet werden.

Die unterschiedlichen Startarten W und F erfordern differenzierte Interpretationen der Ergebnisse.

Nach subjektiver Beurteilung der Piloten stellt der Windenstart eine stärkere psychische Belastung dar als der Flugzeugschleppstart; das Risikoerlebnis im Windenstart wird höher angesetzt, obgleich die Unfallstatistiken (71) ein tatsächlich höheres Risiko dieser Startart nicht belegen. Vom Fliegerischen her stellt der Flugzeugschlepp-Start höhere Anforderungen an den Piloten, wird daher in der Regel erst nach der Anfangsschulung geübt.

Beim Windenstart verdeutlichen die steilen Gradienten der Meßwerte in der Start-Halbminute, daß diese Startart als rasch einsetzender erheblicher Stressor zu werten ist. Aus der Summe der Belastungen lassen sich einzelne Komponenten darstellen, die isoliert zu Veränderungen der physiologischen Parameter führen können:

a) In der frühen Phase des Starts wird eine positive Beschleunigung in zwei Ebenen auf den Körper ausgeübt, nämlich in Richtung der G_x-Achse (sagittal) und der G_z-Achse (longitudinal). Es wird dabei für ca. 10 Sekunden eine Beschleunigung in der hämodynamisch empfindlichen G_z-Achse erreicht, die Reduzierung der diastolischen Füllung des Herzens führt zu einem Anstieg der Herzfrequenz (53).

b) Zur Erzielung der Steigfluglage des Flugzeuges muß aktiv und andauernd das Höhenruder gezogen werden, da der Einklinkpunkt des Schleppseiles aus Sicherheitsgründen vor dem Flugzeugschwerpunkt liegt. Diese Komponente körperlicher Arbeit führt zum Anstieg der kardiopulmonalen Meßwerte.

c) Die um 45 bis 60^0 rückwärtige Kippung der Sitzposition des Piloten während der steilen Steigflug-Phase bedingt einen vermehrten statischen Kraftaufwand bei der Beibehaltung der Körperposition im Flugzeugsitz (2).

d) Neben den genannten physikalischen Einflüssen auf das Verhalten der kardiopulmonalen Parameter sind mentale und emotionale Faktoren (Aufmerksamkeit, Informationsstreß, Risikoerleben) mitbestimmend.

Die quantitativen Veränderungen der Parameter lassen den FlugzeugschleppStart als ähnlich hohen Stressor erkennen wie den Windenstart. Qualitative Unterschiede sind die längere Dauer der erhöhten Werte und die flacheren Gradienten im Anstieg in der frühen Start-Phase. Die angedeutete Plateaubildung der Werte über 2 bis 2,5 Minuten entspricht der Dauer des Schleppfluges. Das Ausklinken des Schleppseils und der Übergang zum reinen Segelflug markieren einen Zeitpunkt fliegerischer Entscheidung; psychische und mentale Faktoren leiten zu einer kurzfristigen Erhöhung der Werte zu diesem Zeitpunkt. Im Gegensatz zum Windenstart sind

hämodynamisch wirksame Beschleunigungsvektoren beim Flugzeugschlepp-Start zu vernachlässigen, ebenso entfällt der körperliche Kraftaufwand für die statische Haltearbeit des Körpers.

Die Höhe der Sauerstoffaufnahme, vergleichbar der beim Windenstart, ist weitgehend bedingt durch vermehrte mechanische Arbeit beim Steuern des Segelflugzeuges. Da die Schleppgeschwindigkeit im F-Schlepp deutlich höher liegt als im Gleitflug, müssen höhere Ruderwiderstände angenommen werden, die einen höheren dynamischen und statischen Kraftaufwand erfordern als im einfachen Gleitflug. Zusätzliche Einflußnahmen auf die Ruderkräfte durch bodennahe Turbulenz oder die Propellerböe des Schleppflugzeuges sind zu erwähnen.

Die psychischen Belastungen sind in erster Linie in den Aufmerksamkeitsanforderungen zu suchen; das Risikoerleben wird von den Piloten subjektiv niedriger eingestuft als beim Windenstart.

In der Flug-Phase ergibt sich die körperliche Belastung im wesentlichen aus der Bedienung der Ruderelemente beim Kurvenflug bzw. Kreisen. Die Ergebnisse verdeutlichen, daß die Komponenten psychischer und körperlicher Belastung in der vorliegenden Versuchsanordnung deutlich schwächer ausgeprägt sind als bei Start und Landung. Im wahren Thermikflug über längere Zeit wurden jedoch Werte ermittelt, die nur gering unterhalb der hier gemessenen Startwerte blieben (104).

Die Lande-Phase ist vorwiegend von psychischer und mentaler Belastung geprägt. Der Abflug von der "Position" leitet eine fliegerische Phase ein, die hohe Aufmerksamkeitsanforderungen und Entscheidungsnotwendigkeiten beinhaltet. Der Landeanflug erfordert die richtige Einschätzung von Flugweg und Sinkrate, die Einhaltung richtiger Fluggeschwindigkeit, korrekte Ruderführung, Beobachtung des Luftraumes und des Landeplatzes (bodenfreiheit, Hindernisfreiheit, Bodenwind) u.a. Zusammen mit der emotionalen Belastung, die im Risikoerleben bei der Annäherung an den Boden erklärt ist, muß der mentalen Belastung ein wesentlicher Anteil an der Steigerung kardiopulmonaler Meßwerte angelastet werden, insbesondere da die körperlichen Aufwendungen für die Bedienung des Flugzeuges sich nur wenig von der Flug-Phase unterscheiden. Die Höhe der Sauerstoffaufnahme bedarf der Erklärung endogener Ursachen, die weiter unten diskutiert werden. Atemantrieb und Herzfrequenzanstieg sind aber hauptsächlich als Folge psychischer Erregung zu interpretieren.

Die psychophysische Belastung wird in der Nachflug-Phase rasch abgebaut; der Rückgang der Meßwerte folgt dabei einer exponentialen Funktion. Da innerhalb der 3-minütigen Beobachtung die Werte in einem Bereich, der der Vorstart-Phase entspricht, verbleiben, ist ein gewisses "hang over" an psychischer Erregung zu diskutieren. Körperliche Belastungen sind in der Nachflug-Phase nicht erkennbar.

In allen Flugphasen ist die gemessene Höhe der Sauerstoffaufnahme durch die eben diskutierten, teilweise meßbaren Komponenten körperlicher Belastungen nicht ausreichend erklärt. Neben den Kraftaufwendungen für die Bedienung des Flugzeuges (siehe Abschnitt 4.2.1) und die statische Haltearbeit des Körpers (W) sind zwei weitere Ursachen der erhöhten Sauerstoffaufnahme zu diskutieren, die hauptsächlich der psychischen Belastung zuzuordnen sind:

1. Der Energiebedarf für eine Tonussteigerung der Muskulatur.
   Durch psychische Anspannung wird eine Tonussteigerung ("Anspannung") der quergestreiften Muskulatur bedingt, auf die wiederholt in der Literatur hingewiesen wird (25,68,76). Dies ist vereinbar mit der Beobachtung, daß bei Start (W und F) und Landung, den Situationen hoher mentaler und psychischer Belastung, die Sauerstoffaufnahme ihre höchsten Werte erreicht.
2. Der Energiebedarf für gesteigerte Atemarbeit.
   Der O_2-Eigenbedarf für die Atmung, in Ruhe auf 2% der Sauerstoffaufnahme geschätzt (90), verändert sich bei Steigerung der Ventilation stärker als einfach proportional zum Atemzeitvolumen (AZV); nach theoretischer Überlegung steigt die physikalische Atemarbeit etwa AZV^3-proportional, so daß bei maximaler Ventilation bis zu 30% des gesamten O_2-Verbrauchs für den Energiebedarf der Atmung benötigt werden (7,29,90).

Sowohl in den Meßdaten wie auch in der Beurteilung der Befunde ist die vorliegende Arbeit mit den Ergebnissen anderer Arbeiten vergleichbar. Drei Gesichtspunkte sind jedoch voranzustellen:

1. Die Ergebnisse anderer Untersuchungen beziehen sich weitestgehend auf den Bereich der Berufs- und Militärfliegerei, deren "Arbeitsplatzbedingungen" nur eingeschränkt auf den Segelflug übertragen werden können. Als vergleichbar kann der emotionale Streß, z.B. das Risikoerleben bei Start und Landung, angesehen werden. Nicht vergleichbar sind beispielsweise Anforderungs- und Umgebungsstreß; diese, wie auch der ergonomische Streß (Sitzposition, Cockpit-Auslegung usw.), sind für jeden Flugzeugtyp von eigenem Charakter.
2. Die bekanntgewordenen Daten über kardiopulmonale Parameter sind so rar, daß umfassende Vergleiche nicht möglich sind. Kontinuierliche Messungen, die eine Zurodnung der Meßwerte zu einzelnen Flugphasen erlauben, liegen in angemessener Zahl nur für die Herzfrequenz vor. Den Daten aus unterschiedlichen Arbeiten liegen oft verschiedene Untersuchungsschwerpunkte zugrunde.

3. Bislang sind keine Arbeiten bekannt geworden, die, wie in der vorliegenden Untersuchung, mit Hilfe eines Spektrums geeigneter Parameter psychische und physische Anteile der fliegerischen Gesamtbelastung unter echten Flugbedingungen untersucht haben.

Einheitlich werden Start und Landung als Streßmaxima eines normalen Fluges beurteilt, die zu ausgeprägten Veränderungen neurovegetativ gesteuerter Funktionen führen.

Mit Hilfe der Hautwiderstandsmessung an der unbelasteten linken Hand untersuchte BAADER (1) am vorliegenden Kollektiv die sympathicotone Einstellung und bestätigte die Doppelgipfeligkeit der kardiopulmonalen Meßwerte bei Start und Landung. Das doppelgipfelige Verhaltensmuster wurde für die Herzfrequenz bereits von zahlreichen Autoren beschrieben (5,84,95,96,97,99,102); die vorliegende Untersuchung weist jedoch Werte auf, die im Durchschnitt 10 Schläge/min höher liegen. Als Ursache ist zu deuten, daß von den genannten Autoren in der Regel hocherfahrene Berufspiloten untersucht wurden. Den höchsten Streß befand SEKIGUCHI (107) beim Start, während in anderen Untersuchungen, wie auch in der vorliegenden, die Landung den höchsten Streß markierte (52,97). Die bereits in der Vorstart- und nachfolgend in der Nachflug-Phase erhöhten Werte gegenüber Ruhe (Labor) wurden ebenfalls von CLASING (20,21) beschrieben.

Über das Verhalten der Atemfrequenz bei Segelflugpiloten liegen keine konkreten Vergleichsdaten vor; von EICHLER (35), der an Segel- und Motorflugpiloten Herz- und Atemfrequenz gemeinsam registrierte, ist lediglich die Aussage nutzbar, daß bei Start und Landung eine Steigerung der Atemfrequenz zu verzeichnen ist. Mittlere Atemfrequenzen um 20 bis 26/min (mit Gipfelwerten bei Start und Landung) wurden an durchweg erfahrenen Piloten unterschiedlicher Flugzeugklassen gemessen (58,61,63,66,91,95); die Atemfrequenzen in der vorliegenden Arbeit sind in den Belastungsspitzen Start und Landung erheblich höher, die Werte der Flug-Phase mit den Daten in der Literatur vergleichbar.

Die Bewertung der Atemfrequenz als Parameter psychischer Belastung ist nicht einheitlich. Während COHEN(23) und RAABE (91) den Wert der Atemfrequenz als Indikator für psychische Anspannung verneinten, befand EICHLER (35) diesen Parameter als empfindlicheren Indikator für starken psychischen Streß als die Herzfrequenz. Die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit verdeutlichen erneut, daß die Steigerung der Atemfrequenz beim Fliegen tatsächlich weitgehend durch psychische Belastung begründet ist.

TABELLE 24: SAUERSTOFFAUFNAHME VON PILOTEN BEIM FLIEGEN UNTERSCHIEDLICHER FLUGZEUGMUSTER.
ZUSAMMENSTELLUNG VON DATEN AUS DER LITERATUR, ERGÄNZT DURCH DIE EIGENEN DATEN.

AUTOR	VORSTART ml/min $\dot{V}_{O_2}$	START ml/min $\dot{V}_{O_2}$	FLUG ml/min $\dot{V}_{O_2}$	LANDUNG ml/min $\dot{V}_{O_2}$
KARPOVICH 1946				
-SIMULATOR			356	
LITELL 1969				
-HUBSCHRAUBER	330	420	320	390
-PROP.-FLUGZ.	360	580	400	500
BILLINGS 1970				
-HUBSCHRAUBER	420	540	460	540
EIGENE DATEN				
-WINDENSTART	387 ± 33	551 ± 16	481 ± 26	562 ± 43
-F-SCHLEPP-ST.	415 ± 24	601 ± 17	520 ± 51	558 ± 63

TABELLE 25: KALORISCHER UMSATZ VON PILOTEN BEIM FLIEGEN UNTERSCHIEDLICHER FLUGZEUGMUSTER.
ZUSAMMENSTELLUNG VON DATEN AUS DER LITERATUR, ERGÄNZT DURCH DIE EIGENEN ERGEBNISSE.

AUTOR	RUHE/VORSTART KJ/min·m² (Kcal/min·m²)	START KJ/min·m² (Kcal/min·m²)	FLUG KJ/min·m² (Kcal/min·m²)	LANDUNG KJ/min·m² (Kcal/min·m²)
KARPOVICH 1948 -SIMULATOR	2,81(0,67)	3,85 (0,92)		
COREY 1965 -LEICHTFLUGZEUG	3,35 BIS 3,64 (0,8 BIS 0,87)	5,74 (1,37	BIS BIS	6,32 1,52)
LORENTZEN 1965 -MILITÄRJET	3,22 (0,77)	3,22 (0,77	BIS BIS	6,74 1,62)
KAUFMAN 1970 -TRANSPORTFLUGZEUG	3,35 (0,8)	3,39 (0,82	BIS BIS	5,07 1,22)
MELTON 1975 -LEICHTFLUGZEUG			5,53 (1,33)	
EIGENE DATEN -SEGELFLUGZEUG				
W	4,02 (0,97)	5,90 (1,42)	5,40 (1,29)	6,07 (1,45)
F	4,48 (1,08)	6,53 (1,56)	5,53 (1,32)	5,99 (1,43)

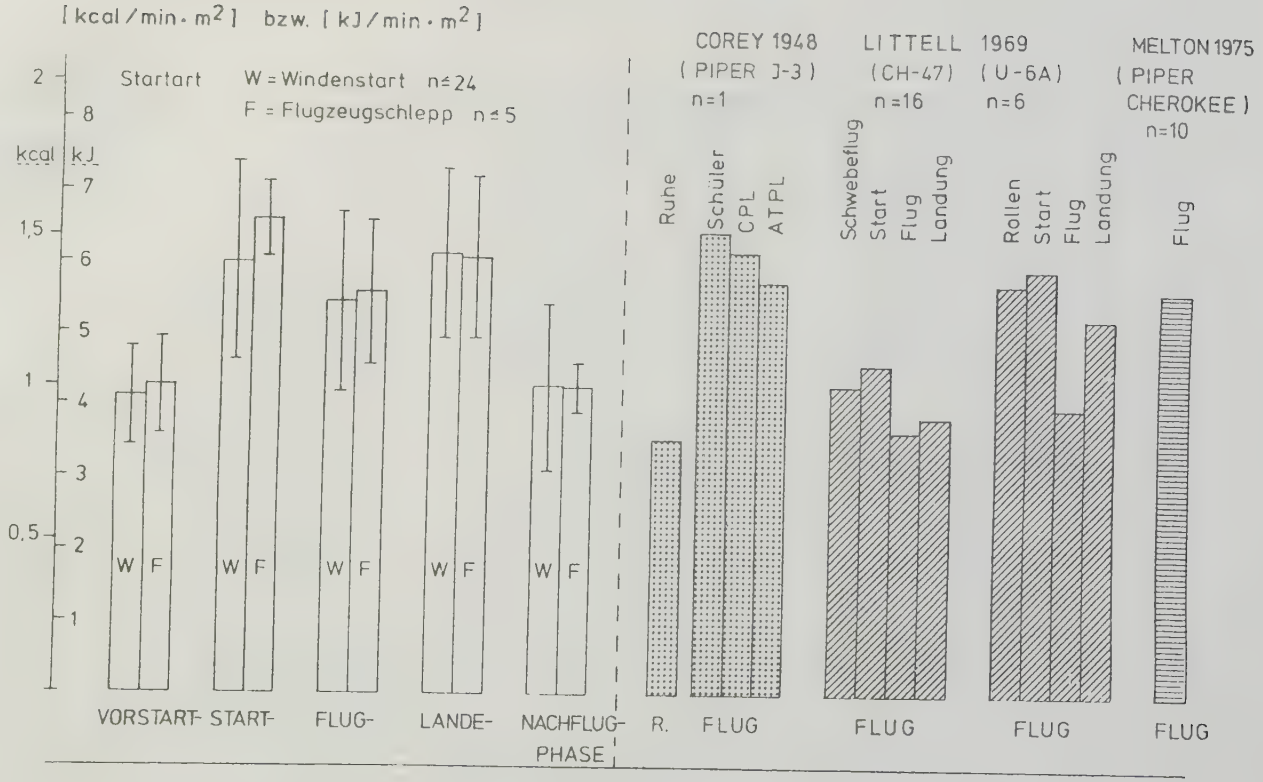


ABB. 25: GRÖSSE DES KALORISCHEN UMSATZES IM SEGELFLUG (LINKE SEITE) IM VERGLEICH ZUM FLIEGEN ANDERER LUFTFAHRZEUGE (RECHTE SEITE; ANGABEN AUS DER LITERATUR).

Veränderungen des Atemminutenvolumens beim Fliegen von motorgetriebenen Flugzeugen wurden von nur wenigen Autoren beschrieben (25,81,89), kontinuierliche Messungen des $\dot{V}_E$ zur Frage der Hyperventilation beim Fliegen nur von MURPHY (81) durchgeführt. Beim Fliegen einmotoriger Sportflugzeuge ermittelte er Werte, die mit den eigenen gut übereinstimmen. Hohe $\dot{V}_E$-Werte bei einzelnen Piloten unserer Untersuchung lassen, im Einklang mit den Ergebnissen von MURPHY (81), MELTON (78) und PETTYJOHN (89), das Vorkommen von Hyperventilation auch bei Segelflug-Piloten vermuten (vgl. Abschnitt 5.5.2).

Die Höhe der Sauerstoffaufnahme beim Segelflug, wie sie in der vorliegenden Arbeit gemessen wurde, ist vergleichbar mit den Ergebnissen jener Autoren, die sich mit der Sauerstoffaufnahme bei Piloten von Hubschraubern (9,68), einmotorigen Leichtflugzeugen (25,78), Militärjets (70) und Transportflugzeugen (57) befaßten. Eine Übersicht über die Ergebnisse, die nur teilweise eine Differenzierung nach Flugphasen erlaubten, gibt Tabelle 24. Im kalorischen Umsatz spiegeln sich die Verhältnisse der Sauerstoffaufnahme wider (Tab. 25, Abb. 25). Hierbei zeigt sich allgemein, daß für das Fliegen von Segelflugzeugen (Kurzzeitflüge einschließlich Start und Landung) sowohl der kalorische Umsatz wie auch die Sauerstoffaufnahme, als physiologische Korrelate körperlicher Arbeit, um ca. 10 bis 20% höher liegen als die Vergleichsdaten der Literatur.

Dennoch ist das Segelfliegen von der körperlichen Belastung her als "leichte Arbeit" einzustufen; die bei stundenlangen Flügen auftretende Ermüdung (79,105) ist durch die Größenordnung der körperlichen Arbeit und der resultierenden metabolischen Prozesse nicht ausreichend erklärt.

5.4 Sportmedizinische Gesichtspunkte

5.4.1 Der Einfluß der kardiozirkulatorischen Leistungsfähigkeit auf die Streßreaktion beim Segelflug

Sportmedizinisch relevant ist die Frage, ob die körperliche Ausdauerleistungsfähigkeit hinsichtlich der Adaptation an die Streßform Segelflug einen Einfluß ausübt. Eine große Zahl von Hochleistungspiloten im Segelflug betreibt ein körperliches Ausdauertraining; es ist bisher jedoch nicht bewiesen, daß eine verbesserte kardiozirkulatorische Leistungsfähigkeit in irgendeinerweise Vorteile im wettbewerbsmäßigen Segelflug erbringt.

Eine indirekte Wirkung des Trainings wäre zu erwarten angesichts eines niedrigeren vegetativen Regelniveaus, welches sich in geringerer Katecholaminausschüttung auch bei psychischer Streßsituation verdeutlicht (55). Dagegen ist nach WEGMANN

(118), der den Einfluß des Ausdauertrainings auf das kardiovaskuläre System und die Nebennierenrinden-Hormone unter verschiedenen Streßformen (Hypoxie, Beschleunigung, körperliche Arbeit und Orthostase-Streß) untersuchte, die verbesserte kardiozirkulatorische Leistungsfähigkeit nur vorteilhaft für körperliche Ausdauerbelastungen. Die biologischen Vorteile lassen sich auf andere Streßformen nicht allgemein übertragen. Dies wird, auf das Fliegen bezogen, von SARVIHARJU (101) bestätigt, der vor bzw. nach einem körperlichen Ausdauertraining keine signifikanten Unterschiede in der Katecholaminausscheidung, die unter fliegerischer Belastung regelmäßig erhöht ist (17,28,36,46), nachweisen konnte. Die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit stützen die Annahme, daß Unterschiede in der Atem- und Kreislaufökonomie auf der Grundlage individuell unterschiedlichen Ausdauertrainingszustandes bei der psychophysischen Belastung des Fliegens nicht zu erwarten sind. In der Ansprechbarkeit auf psychische Streßsituationen, hier besonders durch Start und Landung gegeben, sind alle Piloten gleich, unabhängig von der kardiozirkulatorischen Leistungsfähigkeit. Diese Aussage ist insoweit einzuschränken, daß sie durch die vorliegende Untersuchung nur für kurze Flüge Gültigkeit erfährt. Welchen Stellenwert der kardiozirkulatorischen Leistungsfähigkeit hinsichtlich des Phänomens der Ermüdung bei Flügen langer Dauer und komplexer Belastungen zukommt, kann durch die hier vorliegenden Ergebnisse nicht beantwortet werden.

5.4.2 Der Einfluß der Flugerfahrung auf die Streßreaktion beim Segelflug

Während der Einfluß der kardiozirkulatorischen Leistungsfähigkeit auf die Regulation der kardiopulmonalen Parameter zumindest fraglich bleibt, ist der Einfluß der Flugerfahrung auf das Verhalten der Herzfrequenz (16,45,107), der Atemfrequenz (91) und der Sauerstoffaufnahme (25) wiederholt beschrieben worden. Umfassende Untersuchungen der kardiopulmonalen Parameter unter dem Gesichtspunkt der Flugerfahrung sind bislang nicht bekannt geworden.

In allen Parametern mit Ausnahme von der in-/exspiratorischen Sauerstoffdifferenz wies Gruppe 3 (Piloten hoher Flugerfahrung) im Mittel regelmäßig niedrigere Werte auf als die Gruppen 1 und 2. In den Phasen höchster psychophysischer Belastung (Start und Landung) waren die Unterschiede am ausgeprägtesten.

Die Adaptation an die Streßform Fliegen (108) zeigt sich somit in einer ökonomischeren Atem- und Kreislaufregulation, die sich bei den hocherfahrenen Piloten in den Phasen hoher Aufgabenanforderungen besonders deutlich von der kardiopulmonalen Regulation bei unerfahrenen Piloten absetzt. Dennoch sind auch bei hocherfahrenen Piloten die ausgeprägten Überhöhungen der Werte über das für

die Steuerung des Flugzeuges notwendige Maß physikalischer Arbeit hinaus feststellbar, so daß die beschriebenen Regulationsmechanismen unabhängig von der Flugerfahrung ihre Gültigkeit behalten.

Unter allen untersuchten Parametern stellt die Atemfrequenz den sensitivsten Index dar, Kollektive unterschiedlicher Flugerfahrung zu differenzieren; für die Atemfrequenz waren die Gruppenunterschiede in der Start-, Flug- und Lande-Phase signifikant.

Im Verhalten des Atemminutenvolumens sind Gruppenunterschiede nicht sicher erkennbar. Zwar wird deutlich, daß im Mittel die Piloten höherer Flugerfahrung die niedrigsten Atemminutenvolumina aufweisen, jedoch sind die Unterschiede zu den beiden anderen Gruppen, die sehr ähnliche Werte aufweisen, statistisch nicht zu sichern (Abb. 16). Die lineare Regression zwischen Flugerfahrung, gegeben durch die Anzahl der Flugstunden, und höchstem erreichtem Atemminutenvolumen in der Start-Phase (W)

$$y = -0{,}0085x + 25{,}62$$

(y = Atemminutenvolumen, x = Flugstunden)

läßt zwar den Trend erkennen, daß mit Zunahme der Flugerfahrung der Anstieg des Atemminutenvolumens in der psychophysisch belastenden Start-Phase geringer ausfällt, die niedrige Korrelation von r = 0,40 läßt aber offen, ob sich die Messung des Atemvolumens eignet, den Einfluß der Flugerfahrung auf die Streßreaktion beim Segelflug darzustellen. In der flugmedizinischen Literatur finden sich ebenfalls keine Hinweise zum Einfluß der Flugerfahrung auf die Höhe der Atemminutenvolumina.

Die Sauerstoffaufnahme, die in den meisten Halbminuten der Flug- und Lande-Phase ebenfalls signifikante Gruppenunterschiede aufdeckte, weist aus, daß hocherfahrene Piloten einen niedrigeren kalorischen Umsatz haben als Piloten geringer und mittlerer Flugerfahrung. Legt man die Annahme zugrunde, daß ein beträchtlicher Teil der unter Flugbedingungen gemessenen Sauerstoffaufnahme einer psychisch bedingten Tonussteigerung der quergestreiften Muskulatur anzulasten ist (25,68,76), so ist die Beobachtung bemerkenswert, daß die Piloten der Gruppe 2 (durchschnittliche Flugerfahrung) mit größerer "Anspannung" flogen als die Piloten der beiden anderen Gruppen. Eine mögliche Erklärung liegt in dem Umstand, daß die Flugschüler (GR 1) sich in Begleitung eines Fluglehrers sicherer, die Piloten der Gruppe 2 durch die mitfliegende Person eher irritiert fühlten.

Die Herzfrequenz, in zahlreichen flugmedizinischen Arbeiten als alleiniges Kriterium der psychophysischen Belastung von Piloten herangezogen (5,10,35,58,61,66,-84,95,96,97,99,102,103, für ausführliche Literatur siehe 43), ist nach den Ergebnissen der vorliegenden Arbeit aufgrund der großen interindividuellen Streuung kein ausreichend empfindlicher Parameter, um den Einfluß des Merkmals "Flugerfahrung" auf die Streßreaktion und -adaptation sicher zu erfassen.
Die Untersuchung zeigt, daß die Flugerfahrung, hier dokumentiert als Zahl der Flugstunden, ein wesentliches Merkmal für die Adaptation an die Streßform Segelflug darstellt. Inwieweit die ständige Inübunghaltung, d.h. die Anzahl der Flüge pro Zeiteinheit, eine Variable innerhalb der Flugerfahrung darstellt, wurde hier nicht untersucht; alle Piloten waren in der laufenden Saison regelmäßig fliegerisch aktiv.

5.5 Flugmedizinische Gesichtspunkte

Die Beurteilung der Tauglichkeit zum Piloten setzt voraus (40):

1. Kenntnis und Vorhersagbarkeit von Leistungsanforderungen an den Menschen, ausgehend vom System und der operationellen Umgebung und
2. Kenntnis der körperlichen Reaktionen auf die Anforderungen durch das System und die operationelle Umgebung.

Mangels konkreter Daten basiert die Feststellung der Tauglichkeit zum Segelflugzeugführer durch den fliegerärztlichen Sachverständigen (82) bislang auf der ungefähren Einschätzung der psychophysischen Belastung beim Fliegen. Die vorliegende Arbeit soll helfen, die körperlichen Streßreaktionen beim Segelflug überschaubarer zu machen.
Die Tauglichkeitsuntersuchung hat zu berücksichtigen, daß die Sportart Segelflug Personen vom 14. Lebensjahr an bis jenseits des 7. Lebensjahrzehnts die gleichen sportlichen Bedingungen bietet, aber auch die gleichen Leistungsanforderungen stellt.
Die Ergebnisse zeigen, daß die Komponente körperlicher Arbeit niedrig, die der psychischen Belastung hoch anzusetzen sind; dabei sind die spezifischen physikalischen Einflüsse (g-Belastung, Hitze- bzw. Kältestreß usw.) hier nicht untersucht worden. Alle genannten Komponenten können zu der markanten Steigerung von Ventilation und Herzfrequenz beitragen. Sie ist aber in erster Linie Ausdruck der psychischen Erregung. Die Vorhersage, wie der Einzelne unter fliegerischer Extrembelastung reagiert, ist für den untersuchenden Arzt fast immer unmöglich; die gesundheitlichen Anforderungen müssen daher so hoch angesetzt werden, daß auch außergewöhnliche streß-induzierte Belastungen des kardiopulmonalen Systems toleriert werden können.

5.5.1 Kardiale Belastung

Nach BOOZE (12) ist in den USA die koronare Herzerkrankung (Koronarsklerose) der häufigste Grund für die Verweigerung der Fliegertauglichkeit bei den periodischen fliegerärztlichen Untersuchung. Es ist so als Erfolg der medizinischen Selektion bzw. regelmäßigen Überwachung zu werten, daß die altersbezogene Inzidenz der koronaren Herzerkrankung bei Berufspiloten signifikant niedriger ist als in der übrigen Bevölkerung (64). Dennoch ist die koronare Herzerkrankung als Ursache von fatalen Flugunfällen in der Zivil- und Militärluftfahrt von großer Bedeutung (15,47,73,74,80,94) und wird nach MASON (74) als Flugunfallursache sogar noch unterschätzt.

Bei Segelflugpiloten sind gesundheitliche Ereignisse in 5,6% aller Flugunfälle zwischen 1973 und 1977 als Ursache erkannt worden (65); über die Bedeutung der koronaren Herzerkrankung gibt diese Studie aber keinen Aufschluß.

In der fliegerärztlichen Untersuchung hat die Belastungs-Elektrokardiographie als Maßnahme der Früherkennung der koronaren Herzerkrankung einen festen Platz; Art und Intensität der Belastung sind aber in den gültigen Richtlinien für die Feststellung der Fliegertauglichkeit (82) nicht ausreichend festgelegt.

In der vorliegenden Untersuchung sind in Einzelfällen Herzfrequenzen von mehr als 160/min beobachtet worden. Zusätzlich beinhaltet die Sportart Segelflug notwendigerweise Tätigkeiten am Boden (z.B. das Aufrüsten und Bewegen der Segelflugzeuge), welche erhebliche körperliche Anstrengungen und damit kardiale Belastungen bedeuten. Dies unterstreicht die Notwendigkeit, bei älteren und bei mutmaßlich kardial gefährdeten Personen eine Ergometerbelastung hoher Intensität mit Registrierung des Belastungs-EKG in die Tauglichkeitsuntersuchung einzuschließen und eine kritische Beurteilung der Flugtauglichkeit, besonders bei älteren Fluganfängern, anzusetzen (16). EICHLER et al. (35) empfehlen in Zweifelsfällen, das EKG während des Fluges zu registrieren und die Beurteilung der Tauglichkeit vom Befund abhängig zu machen.

Der Einsatz von Beta-Rezeptoren-Blockern, deren dämpfende Wirkung auf das Herzfrequenzverhalten beim Segelflug von CLASING (16,19) beschrieben wurde, ist in naher Zukunft denkbar (24), derzeit aber nach geltender Vorschrift mit dem Steuern eines Flugzeuges nicht vereinbar.

5.5.2 Hyperventilation

Die Höhe der Atemminutenvolumina beim Segelfliegen, aufgrund der psychischen Komponente weit über die Erfordernisse des Fliegens hinaus gesteigert (siehe Abb. 22), läßt zumindest in einzelnen Fällen (Versuchspersonen 4,21,26) eine Hyperventilation vermuten.

Erstmals im Jahre 1941 von HINSHAW (48,49) beschrieben, wird die Hyperventilation in der Flugmedizin als ernsthafte Gefahr hingestellt (42,43). Ein ausführlicher Literaturüberblick über die Hyperventilation bei Flugzeugführern, die Ursachen und ihre Bedeutung für die Flugsicherheit, wird von GIBSON (42) gegeben. Als Ursachen werden neben Hitzestreß, Vibration und Beschleunigung vor allem psychologische Faktoren wie Angst, Erwartungsanspannung und Risikoerlebnis (11) genannt. Die Auswirkungen der Hyperventilation auf den Organismus sind komplex. Im Kreislaufsystem steht eine Herzfrequenzzunahme und ein gleichzeitiger Abfall des arteriellen Mitteldrucks im Vordergrund (93). Die Alkalose des Blutes mit einer Verschiebung der Sauerstoff-Dissoziationskurve (BOHR-Effekt) infolge einer Hyperventilation ist seit langem bekannt. Das Absinken der alveolären CO_2-Spannung auf 19 bzw. 16 mmHg, entsprechend einer Hyperventilation von 26 bzw. 40 l/min ATPS (114), führt zu einer beträchtlichen Reduzierung der cerebralen Durchblutung; bei einer CO_2-Spannung von 15 mmHg ist die cerebrale Durchblutung um 33% vermindert (59). Die Einwirkung einer Beschleunigung in der G_z-Achse, wie sie schon beim Kurvenflug erreicht wird, reduziert die Hirndurchblutung zusätzlich (14). Daraus resultiert eine ausgeprägte Abnahme der psychomotorischen Leistungsfähigkeit (3,4); die Reaktionszeit wird hochsignifikant verlängert (114). Auch wenn mit der Versuchsanordnung der vorliegenden Arbeit gezielt die Frage der Hyperventilation beim Segelfliegen nicht untersucht oder Wirkungen nicht beobachtet wurden, lassen die hohen Atemminutenvolumina bei ca. 10% der Versuchspersonen die Annahme zu, daß die Hyperventilation als potentielles Flugsicherheitsrisiko auch im Segelflug existent ist.

6. ZUSAMMENFASSUNG

Für die Einschätzung des fliegerischen Stresses wurden häufig einzelne kardiale oder pulmonale Meßgrößen herangezogen, die sowohl unter psychischer wie auch unter physischer Belastung Veränderungen erfahren. Um die Anteile dieser Faktoren an den Gesamtveränderungen beim Fliegen qualitativ und quantitativ zu erfassen, ist es erforderlich, mehrere kardiopulmonale Parameter simultan unter echten fliegerischen Bedingungen zu messen und gemeinsam zu interpretieren. Als Bezugsparameter für die Größe der rein körperlichen Arbeit dient hierbei die Sauerstoffaufnahme.

Bei 29 Segelflugpiloten zwischen 16 und 42 Jahren ($\bar{x}$=25,7 Jahre), die sich zuvor einer ausbelastenden spiroergometrischen Untersuchung im Labor unterzogen hatten, wurden vor, während und nach Platzrundenflügen im Segelflugzeug die Parameter Herzfrequenz (HF), Atemfrequenz (AF), Atemminutenvolumen ($\dot{V}_E$) und Sauerstoffaufnahme ($\dot{V}O_2$) kontinuierlich registriert. Aus $\dot{V}O_2$ wurde für alle Flugphasen der kalorische Umsatz errechnet.

Die tragbaren Meßwertaufnehmer und Telemetrie- bzw. Registriergeräte kamen nach vorheriger Eignungsuntersuchung, die beschrieben ist, im Flugzeug zum Einbau.

Bei Flügen mit Windenstart (24 Piloten) und Flugzeugschleppstart (5 Piloten) sind die Veränderungen der kardiopulmonalen Parameter von ähnlicher Größenordnung; bei letzterer Startart sind die Veränderungen entsprechend der Dauer diese Phase lediglich länger anhaltend.

Bei beiden Startarten sind bereits in der Vorstart-Phase HF, AF und $\dot{V}_E$ um 50-70% gegenüber Ruhe (Labor) erhöht, während $\dot{V}O_2$ einen nur geringen Anstieg erfährt (ca. 25%). Beim Start werden AF und HF beinahe verdoppelt, während $\dot{V}_E$ bis zu 140% gesteigert wird; $\dot{V}O_2$ erreicht ca. 80% Steigerung gegenüber Ruhe (Labor). In der Flug-Phase nivellieren AF, HF und $\dot{V}_E$ bei 80%, $\dot{V}O_2$ bei 40% oberhalb der Ruhewerte. In der Lande-Phase sind die Werte denen der Start-Phase vergleichbar. Die Werte der Nachflug-Phase entsprechen etwa denen der Vorflug-Phase. Die individuelle kardiozirkulatorische Leistungsfähigkeit (Ausdauertrainingszustand), gemessen an der maximalen Sauerstoffaufnahme ($\dot{V}O_2$max), ist für die Einstellung der kardiopulmonalen Parameter unter der psychophysischen Belastung kurzzeitiger Segelflüge ohne erkennbare Bedeutung.

Dagegen nimmt die Flugerfahrung Einfluß auf die Höhe der flugphasenspezifischen Veränderungen einzelner Meßgrößen, wobei das Grundmuster erhalten bleibt. Mit zunehmender Flugerfahrung nimmt die Höhe der Veränderungen von AF und $\dot{V}O_2$

signifikant, von $\dot{V}_E$ in der Tendenz ab; HF ist aufgrund großer interindividueller Streuung nicht geeignet, Unterschiede in der Flugerfahrung aufzudecken.

Die Sauerstoffaufnahme und der kalorische Umsatz machen deutlich, daß das Segelfliegen einer leichten körperlichen Arbeit (<20% von $\dot{V}O_2max$) entspricht. Verglichen mit der kardiopulmonalen Regulation bei einer entsprechend niedrigen körperlichen Arbeit (50 Watt) ist die Einstellung der kardiopulmonalen Parameter beim Segelfliegen deutlich unökonomischer. Die über das Maß für die körperliche Arbeit beim Steuern eines Flugzeuges hinaus gesteigerten Veränderungen von HF, AF und $\dot{V}_E$ sind als Folge der psychischen Belastung zu interpretieren. Die Anstiege von $\dot{V}O_2$ sind teils durch Komponenten körperlicher Arbeit und physikalischer Einflüsse (z.B. Beschleunigung), teils durch psychisch bedingte Tonussteigerung der quergestreiften Muskulatur und durch erhöhte Atemarbeit erklärt.

Wie beim Fliegen anderer Luftfahrzeuge sind Start und Landung als Streßmaxima zu erkennen. Die psychophysische Belastung von Segelflugpiloten erscheint geringfügig höher als für Piloten anderer Luftfahrzeugklassen beschrieben. In mehreren Fällen beobachtete ungewöhnlich hohe Herzfrequenzen und Atemminutenvolumina beim Segelfliegen weisen darauf hin, daß kardiale Belastung und Hyperventilation als Flugsicherheits-Risiken auch im Segelflug ein besonderes Augenmerk verdienen. Die Notwendigkeit intensiver fliegerärztlicher Tauglichkeitsuntersuchungen wird unterstrichen.

7. LITERATURVERZEICHNIS

1. Baader,P.:
Psychophysiologische Untersuchung von Furcht und Angst beim Segelfliegen
Diplomarbeit Psycholog. Inst. d. Univ. Tübingen (1980)

2. Babushkin,U.I.,P.K. Isakov,V.B. Malkin and V.V. Usachev:
in "Textbook of Aviation Physiology" Part 2
Edit.: Gillies,J.A.
Pergamon Press,Oxford-London-New York (1965)

3. Balke,B. and J.P. Lillehei:
Effect of hyperventilation on performance
J. Appl. Physiol. 9, 371-375 (1956)

4. Balke,B.:
Inflight hyperventilation during jet pilot training
J. Aviat. Med. 28, 241-244 (1957)

5. Balke,B.,C.E. Melton and C. Blake:
Physiological stress and fatigue in aerial missions for the control of forest fires
Aerospace Med. 37, 221-227 (1966)

6. Bannov,Y.V. and V.S. Lozinskiy:
Certain personality characteristics as related to success of pilot training
Moscow Kosmichesk. Biol. Aviak. Med. (USSR Report, Space Biology and Aerospace Medicine) 5,84-87 (1980)

7. Bartels,H.:
Der Gaswechsel
in "Kurzgefaßtes Lehrbuch der Physiologie"
Hrsg.: Keidel,D.
Thieme-Verlag,Stuttgart (1970)

8. Benson,A.J.,H.F. Huddleston and J.M. Rolfe:
A psychophysiological study of compensatory tracking on a digital display
Human Factors 7, 457-472 (1965)

9. Billings,C.E.,R. Basin and R.J. Gerke:
Physiological cost of piloting rotary wing aircraft
Aerospace Med. 41, 256-258 (1970)

10. Billings,C.E.,R.J. Gerke,R.C. Chase and J.J. Eggspuehler:
Stress and strain in student helicopter pilots
Aerospace Med. 44,1031-1035 (1973)

11. Bodlée,H.:
Motor- und Segelflug
Hanns Reich Verlag,München (1971)

12. Booze,C.F.,J.K. Pidkowicz,A.W. Davis and F.A. Bolding:
Post mortem atherosclerosis findings in general aviation accident pilot fatalities
Aerospace Medical Association
Annual Scientific Meeting,Washington May 14-17,1979

13. Bowman J.S.and H.J. v.Beckh:
Physiologic and performance measurement in simulated airborne combined stress environments
Aviat. Space Environ. Med. 50,604-608 (1979)

14. Brent,H.P.,T.M. Carey,T.J. Powell,J.W. Scott,W.G.R.Taylor and W.R. Franks:
Synergisms between effects of hyperventilation,hypoglycemia,and positive acceleration
J.Aviat.Med. 28, 193 (1957)

15. Buley,L.E.:
Incidence,causes,and results of airline pilot incapacitation while on duty
Aerospace Med.40,64-70 (1969)

16. Burchardt,W.:
EKG-Speicheruntersuchungen zur Frage der Herz-Kreislaufbelastung beim Segelfliegen
Inaugural-Dissertation,Münster(1969)

17. Burton,R.R.,W.F. Storm,L.W. Johnson and S.D. Leverett:
Stress responses of pilots flying high-performance aircraft during aerial combat manoevers
Aviat. Space Environ. Med. 48,301-307 (1977)

18. Casaburi,R.,B.J. Whipp,K. Wasserman,W.L. Beaver and S.N. Koyal:
Ventilatory and gas exchange dynamics in response to sinusoidal work
J. Appl. Physiol.: Respirat. Environ. Exerc. Physiol 42,300-311 (1977)

19. Cerettelli,P.,R. Sikand and L.E. Farhi:
Readjustment in cardiac output and gas exchange during onset of exercise and recovery
J. Appl. Physiol. 21, 1345-1350 (1966)

20. Clasing,D.,R. Rujbr und G. Stedtfeld:
Das Verhalten der Herzfrequenz beim Segelflug nach Gabe eines Beta-Rezeptorenblockers
Sportarzt Sportmed. 22, 86-91 (1971)

21. Clasing,D.,G. Vogler,W. Burchardt und E.J. Klaus:
Herzfrequenz und psychische Anspannung beim Segelfliegen
Med. Welt 19, 808-811 (1971)

22. Clasing,D.:
Psychische Belastung beim Fliegen und Beta-Rezeptoren-blockade
Sportarzt Sportmed. 25, 269-272 (1974)

23. Cohen,H.D.,D.R. Goodenough,H.A. Witkin,P. Oltman,H. Gould and E. Shulman:
The effects of stress on components of the respiratory cycle
Psychophysiology 12, 377-380 (1975)

24. Cooke,J.N.C. and A.N. Nicholson:
Beta-adrenoceptor antagonists-central effects in "Prospective Medicine Opportunities in Aerospace Medicine"
AGARD Conference Proceedings No. 231, A10-1 - A10-3 (1978)

25. Corey,E.L.:
Pilot metabolism and respiratory activity during varied flight tasks
J. Appl. Physiol. 1, 35-44 (1948)

26. Craig,F.N.,E.G. Cummings and W.V. Blevins:
Regulation of breathing at beginning of exercise
J. Appl. Physiol. 18, 1183-1187 (1963)

27. Davis,J.A.,B.J. Whipp and K. Wasserman:
The relation of ventilation to metabolic rate during moderate exercise in man
Eur. J. Appl. Physiol.44, 97-108 (1980)

28. Debijadji,R.,L. Perovic and V. Varagic:
Evaluation of the sympatho-adrenals activity in pilots by determination of urinary catecholamines during supersonic flight
Aerospace Med. 41, 677 (1970)

29. De Marées,H.:
Sportphysiologie
Reihe "Medizin von heute" Nr. 10
TROPON ,Köln (1976)

30. Diamond,L.B.,R. Casaburi,K. Wasserman and B. Whipp:
Kinetics of gas exchange and ventilation in transition from rest or prior exercise
J. Appl. Physiol.: Respirat. Environ. Exercise Physiol. 43, 704-708 (1977)

31. Diringshofen,H.v. und B.v.Diringshofen:
Elektrokardiographie,Blutdruckschreibung und Pneumotachographie im Motorfluge
Acta Aerophysiologica 6, 48-60 (1933)

32. Drinkwater,B.L.:
Performance of civil aviation pilots under conditions of sensory input overload
Aerospace Med. 38, 164-170 (1967)

33. DuBois (1916):
Nomogramm zur Bestimmung der Körperoberfläche aus Größe und Gewicht
in "Wissenschaftliche Tabellen Documenta GEIGY" 5.Aufl.
CIBA-GEIGY,Basel (1971)

34. Eger,K.H.:
Untersuchungen zur Validität eines tragbaren Lungenfunktionsgerätes
Inaugural-Dissertation,Tübingen (1980)

35. Eichler,J.,I. Lobsien und S. Pohlert:
Telemetrie der Herz- und Atemfrequenz bei Führern von Segel- und Motorsportflugzeugen unter verschiedenen Flugbedingungen
Mschr. Unfallheilkunde 78, 283-289 (1975)

36. Ettema,J.H. and R.L. Zielhuis:
Physiological parameters of mental load
Ergonomics 14, 137-144 (1971)

37. Euler,U.S.v. und U. Lundberg:
Effect of flying on the epinephrine excretion in Air Force personnel
J. Appl. Physiol. 6,551 (1954)

38. Flug-Informationsdienst (fid):
99 Piloten aus 30 Nationen
Mitteilung von der Segelflug-Weltmeisterschaft 1981
Flug-Informationsdienst 4,7 (1981)

39. Fowler,B.:
The aircraft landing test: an information processing approach to pilot selection
Human Factors 23, 129-137 (1981)

40. Gartner,W.B. and M.R. Murphy:
Concepts of workload
in "Survey of Methods to Assess Workload"
AGARDograph No. 246, 1-2 (1979)

41. GEIGY:
Wissenschaftliche Tabellen Documenta GEIGY
CIBA-GEIGY,Basel (1971)

42. Gibson,T.M.:
Hyperventilation in aircrew: a review
Aviat. Space Environ.Med. 50, 725-733 (1971)

43. Gillies,J.A.:
Textbook of Aviation Physiology
Pergamon Press,Oxford-London-New York (1965)

44. Goerres,H.P.:
Subjective stress assessment: a new,simple method to determine pilot workload
Aviat. Space Environ. Med. 48, 558-564 (1977)

45. Goldman,R.F.:
Physical fitness,flight requirements and age
Aerospace Med. 42, 635-641 (1971)

46. Hale,H.B.,B.O. Hartmann,D.A. Harris,E.W. Williams, R.E. Miranda,J.M. Hosenfeld and B.N. Smith:
Physiologic stress during 50-hour double-crew missions in C-141 aircraft
Aerospace Med. 43, 293-299 (1972)

47. Hemming,F.O.:
Inflight coronary occlusion: a short series of cases
Aerospace Med. 41, 773-775 (1970)

48. Hinshaw,H.C. and W.M. Boothby:
The syndrome of hyperventilation: its importance in aviation
Proc. Staff Meet. Mayo Clin. 16, 211-213 (1941)

49. Hinshaw,H.C.,R.F. Rushmer and W.M. Boothby:
The hyperventilation syndrome and its importance in aviation medicine
J. Aviat. Med. 14, 100-104 (1943)

50. Hollmann,W.:
Der Arbeits- und Trainingseinfluß auf Kreislauf und Atmung
Steinkopf-Verlag,Darmstadt (1959)

51. Hollmann,W.:
Höchst- und Dauerleistungsfähigkeit des Sportlers
Barth-Verlag,München (1963)

52. Hoffmann,H.,M. Koch und W. Schmückling:
Biotelemetrische Untersuchungen des Herz-Kreislaufsystems bei Strahlflugzeugpiloten während des Fluges zur Feststellung der unterschiedlichen fliegerischen Belastungen
Zbl. f. Verkehrs-Med. 14, 193-214 (1968)

53. Howard,P.:
The physiology of positive acceleration
in "Textbook of Aviation Physiology" ,Part 2, 551-687
Edit. Gillies,J.A.
Pergamon Press,Oxford-London-New York (1965)

54. Jaeger,E.
DATASPIR On-line-Betriebssystem EDV 70,80,90
Bedienungsanleitung (Version vom 1.1.1980)
JAEGER,Würzburg (1980)

55. Jung,K.,B. Brisse,G. Pott und J. Schmidt:
Adaptation an den Streß. Einflußnahme eines Ausdauertrainings auf die psychophysische Streßtoleranz
Ärztl. Praxis 64, 1811-1814 (1978)

56. Karpovich,P.V. and R.R. Ronkin:
Oxygen consumption for men of various sizes in the simulated piloting of a plane
Am J. Physiol. 146, 394-398 (1946)

57. Kaufman,W.E.,D.G. Callin and C.E. Haaris:
Energy expenditure of pilots flying cargo aircraft
Aerospace Med. 41, 591-596 (1970)

58. Kessel,R.,E. Lang und P. Denkl:
Stress und Elektrokardiogramm
Telemetrische Untersuchungen während eines Kunstflugprogramms
Münch. Med. Wschr. 118, 1001-1006 (1976)

59. Kety,S.S. and C.F. Schmidt:
The effects of active and passive hyperventilation on cerebral blood flow,cerebral oxygen consumption,cardiac output and blood pressure of normal young men
J. Clin. Invest. 25, 107-119 (1946)

60. Kissen,A.T. and D.W. McGuire:
New approach for on-line,continuous determination of oxygen consumption in human subjects
Aerospace Med. 38, 686-689 (1967)

61. Klein,K.E.,H. Brüner,P. Kuklinski,S. Ruff und H.M.Wegmann:
Über die Auswertung von Untersuchungen am fliegenden Personal der DLH zur Frage der beruflichen Beanspruchung auf der europäischen Kurzstrecke
DFVLR-Veröffentlichung 355-74/2 (1974)

62. Kniga,V.V.:
Perception of instrument data as related to flying experience
Moscow Kosmicheskaya Biol. Aviak. Med. (USSR Report:Space Biology and Aerospace Medicine) 6, 115-119 (1980)

63. Kroll,P.:
Der Anteil der Erwartungsspannung an der fliegerischen Gesamtbelastung und ihre Abhängigkeit vom Tagesrhythmus, gemessen an physiologischen Größen
Inaugural-Dissertation Bonn (1972)

64. Kulak,L.L.,R.L. Wick Jr. and C.E. Billings:
Epidemiological study of inflight airline pilot incapacitation
Aerospace Med. 42, 670-672 (1971)

65. Lauschner,E.,K. Bayer und U. Suchner:
Review of severe light aircraft accidents in the B.R.D. during a 5 years period (1973-1977)
XXIX Int. Congress of Aviation and Space Medicine
Nancy (France),Sept. 7-11,1981

66. Lewis,C.E.,W.L. Jones,F. Austin and J. Roman:
Flight research program: IX. Medical monitoring of carrier pilots in combat - II
Aerospace Med. 38, 581-592 (1976)

67. Lippert,H.:
SI-Einheiten in der Medizin: Einführung in das Internationale Einheitensystem
Urban und Schwarzenberg Verlag,München (1976)

68. Littell,D.E. and R.J.T. Joy:
Energy cost of piloting fixed and rotary wing aircraft
J. Appl. Physiol. 26,282-285 (1969)

69. Loftus,G.R.,V.J. Dark and D. Wiliams:
Short-term memory factors in ground controller/pilot communication
Human Factors 21,369-383 (1979)

70. Lorentzen,F.V.:
Oxygen consumption during flight at moderate G
Aerospace Med. 36, 415-417 (1965)

71. Luftfahrtbundesamt;der Untersuchungsreferent:
Ergebnisse der fachlichen Untersuchungen von Unfällen bei dem Betrieb von Luftfahrzeugen
Jahresberichte 1975 bis 1977,Braunschweig

72. Lusk,N. (1924):
in "Wissenschaftliche Tabellen Documenta GEIGY" S. 534
CIBA-GEIGY,Basel (1971)

73. Mason.J.K.,F.M. Townsend and J.R. Jackson:
Death from coronary diseases while at the controls of an aircraft
Aerospace Med. 34, 858-862 (1963)

74. Mason.J.K.:
Previous disease in aircrew killed in flying accidents
Aviat. Space Environ.Med. 48, 944-948 (1977)

75. McCanne,T.R. and R.S. Iennarella:
Cognitive and somatic events associated with discriminative changes in heart rate
Psychophysiology 17, 18.28 (1980)

76. McKenzie,R.E.:
Concepts of stress
in "Survey of Methods to Assess Workload"
AGARDograph No. 246, 7-9 (1979)

77. Mellerowicz,H.:
Ergometrie - Grundriß der medizinischen Leistungsmessung
Urban und Schwarzenberg Verlag,München (1979)

78. Melton,C.E.,J.M. McKenzie,J.R. Kelln,S.M. Hoffmann and J.T. Saldivar:
Effect of a general aviation trainer on the stress of flight training
Aviat. Space Environ. Med. 46, 1-5 (1975)

79. Mohler,S.R.:
Fatigue in aviation activities
Aerospace Med. 37, 722-732 (1966)

80. Mohler,S.R. and C.F. Booze:
US fatal general aviation accidents due to cardiovascular incapacitation
Aviat. Space Environ. Med. 49, 1225- 1228 (1979)

81. Murphy,T.M. and W.A. Young:
Hyperventilation in aircraft pilots
Aerospace Med. 39, 463-466 (1968)

82. Nachrichten für Luftfahrer (NfL):
Richtlinien für die Feststellung der körperlichen Tauglichkeit des Luftfahrtpersonals
NfL II-25/74
Bundesanstalt für Flugsicherung,Frankfurt (1974)

83. Neubert,C.G. und K. Möckel:
Analyse der Einstellungen und Reaktionen auf psychophysische Belastungen beim Segelfliegen
in Vorbereitung

84. Nicholson,A.N.,L.E. Hill,R.G. Barland and W.J. Krzanowski:
Influence of workload on the neurological state of a pilot during the approach and landing
Aerospace Med. 44,146-152 (1973)

85. Obrist,P.A.,A.W. Langer,A. Grignolo,K.C. Light and J.A. McGubbin:
Measurement,quantification,and analysis of cardiac activity- the cardiac-behavioural interaction
in "Techniques in Psychophysiology"
Edit. Martin,I. and P.H. Venables
Wiley and Sons,Chichester-New York (1980)

86. Opmeer,C.H. and J.P Krol:
Towards an objective assessment of cockpit workload
1.Physiological variables durring different flight phases
Aerospace Med. 44, 527-532 (1973)

87. Pearce,D.H. and H.T. Milhorn Jr.:
Dynamic and steady-state respiratory responses to bicycle exercise
J.Appl. Physiol.:Respirat. Environ. Exercise Physiol. 42,959-967 (1977)

88. Perelli,L.P.:
Physiological aspects of workload/fatigue/stress
in "Survey of Methods to Assess Workload"
AGERDograph No.246, 13-16 (1979)

89. Pettyjohn,F.S.,R.J. McNeill,L.A. Akers and J.M. Faber:
Use if inspiratory minute volumes in evaluation of rotary and fixed wing pilot workload
in "Methods to Assess Workload"
AGARD Conference Proceedings No. 216, A9-1 - A9-3 (1980)

90. Piiper,J. und H.P. Koepchen:
Atmung
in "Physiologie des Menschen"
Hrsg.: Gauer,O.H.,K.Kramer und R. Jung
Urban und Schwarzenberg Verlag,München (1972)

91. Raabe,H.:
Biotelemetrische Untersuchungen des Herz-Kreislauf-systems bei Hubschrauber-Piloten zu Feststellung der unterschiedlichen fliegerischen Belastung
Inaugural.Dissertation,Bonn (1969)

92. Reichmann,H.:
Streckensegelflug
Motorbuch Verlag,Stuttgart (1976)

93. Richardson,D.W.,H.A. Kontos,A.J. Raper and J.L.Patterson:
Systemic circulatory responses to hypocapnia in man
Am.J. Physiol. 223, 1308-1312 (1972)

94. Rigal,D.R.,F.W. Lovell and F.M. Townsend:
Pathological findings in the cardiovascular system of military flying personnel
Am. J. Cardiol. 6,19-26 (1960)

95. Roman,J.A.:
Cardiorespiratory functioning in-flight
Aerospace Me. 38,1117-1119 (1967)

96. Roscoe,A.H.:
Heart rate monitoring of pilots during steep gradient approach
Aviat. Space Environ. Med. 46, 1410-1413 (1975)

97. Roscoe,A.H.:
Use of pilot heart rate measurement in flight evaluation
Clin. Med. 47,86-90 (1976)

98. Rotondo,G.:
Some considerations concerning methods to evaluate and assess workload in aircraft pilots
in "Survey of Methods to Assess Workload"
AGARDograph No. 246, 11-12 (1979)

99. Ruffel Smith,H.P.:
Heart rate of pilots flying scheduled airline routes
Aerospace Med. 38, 1117-1119 (1967)

100. Sanders,M.G.,R.R. Simmons and M.A. Hoffmann:
Visual workload of the copilot/navigator during terrain flight
Human Factors 21, 369-383 (1979)

101. Sarviharju,P.J.,M.E.Huikk,P.T. Jouppila and N.T.Kaerki:
Effect of endurance training on the urinary excretion of noradrenaline and adrenaline during ground and flying activity
Aerospace Med. 42,190-193 (1973)

102. Schane,W.P.:
Continuous ECG recording of helicopter instructor pilots
Aerospace Med. 43, 560-563 (1972)

103. Schmücking,W.:
Biotelemetrische Untersuchungen des Herz-Kreislauf-Systems bei G-91-Jetpiloten während des Fluges zur Feststellung der unterschiedlichen fliegerischen Belastung (Transmission und Fotomission)
Inaugural-Dissertation,Bonn (1971)

104. Schönherr,C.H.:
Indirekt-kalorimetrische Untersuchungen an Segelflug-piloten während des Fluges (vorläufiger Titel)
Inaugural-Dissertetion,Bonn (in Vorbereitung)

105. Schreuder,O.B.,L.G. Lederer,J.K. Gullen,C.G. Gullet, G.J. Kide,J.R. McGraw and R.B. Pender:
Fatigue
Aerospace Med. 37,No. 4 Section II, 1-44 (1966)

106. Seifert,R.:
Die Berücksichtigung des Menschen bei der Entwicklung technischer Systeme
Wehrtechn. Monatshefte 8 (1965)

107. Sekiguchi,C.,O. Yamaguchi,T. Kitajima and Y. Ueda:
Continuous ECG-monitoring on civil air crews during flight operations
Aviat. Space Environ. Med. 48, 872-876 (1977)

108. Selye,H.:
Stress and aerospace medicine
Aerospace Med. 44, 190-193 (1973)

109. Siegel,S.:
Nonparametric Statistics for the Behavioural Sciences
McGraw Hill,New York (1956)

110. Simonov,P.V.,M.V. Frolov and E.A. Ivanov:
Psychophysiological monitoring of operators emotional stress in aviation and astronautics
Aviat. Space Environ. Med. 51, 46-50 (1980)

111. Steininger,K.:
Psychologische Aspekte der Ausbildung von Piloten
Arbeit und Leistung 6, 1-8 (1970)

112. Steininger,K.:
Humanfaktoren in Mensch-Maschine-Systemen
Vortrag: 9. Jahrestagung der Deutschen Gesellschaft für Luft-und Raumfahrt,München (DGLR-76-160),1976

113. Steininger,K.:
Standortbestimmumg des Faktor Mensch in der Sicherheit des Luftverkehrs
Vortrag: Organisation und Mensch - Schwachstellen der Sicherheit
Deutscher Luftfahrtpresseclub,Rhodos 12-16.Nov. 1977

114. Stoddart,J.C.:
Reaction time during voluntary controlled alveolar hyperventilation
Aerospace Med. 38, 171-173 (1967)

115. Suess,W.M.,A.B. Alexander,D.D. Smith,H.W. Sweeney and R.J. Marion:
The effects of psychological stress on respiration: A preliminary study of anxiety and hyperventilation
Psychophysiology 6, 535-540 (1980)

116. Yurchenko,A.A.:
Circadian biorhythms and flight planning
Moscow Kosmicheskaya Biol. Aviak. Med. (USSR Report: Space Biology and Aerospace Medicine) 2,84-87 (1981)

117. Wallington,C.E.:
Meteorologie für Segelflieger
Limpert-Verlag,Frankfurt (1967)

118. Wegmann,H.M. and K.E. Klein:
Physical training status in relation to stress tolerances in "Physical Fitness in Flying"
AGARD Conference Proceedings No. 81, 5-1 - 5-10 (1970)

119. Wever,R.:
Die Tagesperiodik des Menschen
Grundlagen und Probleme
Betriebsärztliches 1, 1-33 (1980)

120. Whipp,B.J. and S.A. Ward:
Ventilatory control dynamics during muscular exercise in man
Int. J. Sports Med. 1, 146-149 (1980)

121. Whipp,B.J.,J.A. Davis,F. Torres and K. Wasserman:
A test to determine parameters of aerobic function during exercise
J. Appl. Physiol.:Respirat. Environ. Exercise Physiol. 50, 217-222 (1981)

8. TABELLARISCHER ANHANG

TABELLE 26: ANTHROPOMETRISCHE UND SPIROERGOMETRISCHE DATEN JEDER EINZELNEN VERSUCHSPERSON (LABORVERSUCH).

VERSUCHSPERSON	ALTER (JAHRE)	GRÖSSE (cm)	GEWICHT (kg)	RUHE				BELASTUNG									
				$\dot{V}_E$ (l/min)	AF (min^{-1})	$\dot{V}_{O_2}$ (ml/min)	HF (min^{-1})	$\dot{V}_{E\ MAX.}$ (l/min)	$AF_{MAX.}$ (min^{-1})	$\dot{V}_{O_2\ MAX.}$ (l/min)	$HF_{MAX.}$ (min^{-1})	LEISTUNG$_{MAX.}$ (MIN'/WATT)	WATT/KG	PWC_{170}	SOLL $\dot{V}_{O_2}$/KG (ml/min kg)	IST $\dot{V}_{O_2}$/KG (ml/min kg)	IST = % VON SOLL (ml/min·kg·$\dot{V}_{O_2}$)
1	21,6	195	90	8,8	17	235	76	118,0	39	3400	185	0,5'300	3,3	2,7	48,4	37,8	72,6
2	26,7	178	60	10,6	13	235	68	96,6	41	2802	193	0,5'300	5,0	3,5	46,5	46,7	101,7
3	27,8	184	69	10,9	11	362	76	105,3	37	3599	193	1,5'300	4,3	2,6	46,1	52,2	113,2
4	24,4	181	71	10,9	23	331	79	117,7	60	2938	192	0,5'300	4,2	2,7	47,2	41,4	87,6
5	25,1	177	63	10,7	14	336	68	103,1	39	2964	185	1' 250	4,0	3,1	46,8	47,0	100,4
6	23,1	177	66	9,4	16	307	74	118,1	53	3377	192	1' 300	4,5	3,0	47,6	51,2	107,4
7	26,4	178	66	7,0	10	280	76	86,6	40	2764	180	1,5'250	3,8	3,0	46,5	41,9	90,1
8	26,0	172	73	9,9	13	285	72	117,6	43	3132	184	1,5'250	3,4	3,0	46,5	42,9	91,7
9	21,7	181	69	10,7	20	274	70	162,2	62	3993	190	2' 300	4,3	3,4	48,4	57,9	119,5
10	33,8	178	68	9,9	20	280	61	118,0	39	2967	177	2' 250	3,6	3,3	43,7	43,6	99,8
11	28,0	194	63	9,2	18	331	74	125,5	54	3370	179	1,5'300	4,8	4,7	45,7	53,5	117,1
12	38	176	75														
13	23,2	178	63	7,7	14	300	58	104,4	41	3182	194	0,5'350	5,6	3,4	47,6	49,0	102,8
14	26,2	178	74	11,4	15	300	55	111,4	42	3182	171	1' 300	4,1	3,7	46,5	43,0	92,6
15	21,9	178	84	10,6	13	325	96	76,9	40	3235	192	0,5'300	3,5	2,3	48,4	38,5	79,6

FORTSETZUNG SIEHE TAB. 27

TABELLE 27: ANTHROPOMETRISCHE UND SPIROERGOMETRISCHE DATEN JEDER EINZELNEN VERSUCHSPERSON (LABORVERSUCH). VP 25 BIS 29 SIND JENE PILOTEN MIT STARTART F BEI DEN FLUGVERSUCHEN.

				RUHE				BELASTUNG									
VERSUCHSPERSON	ALTER(JAHRE)	GRÖSSE(cm)	GEWICHT(kg)	$\dot{V}_E$ (l/min)	AF (min^{-1})	$\dot{V}_{O_2}$ (ml/min)	HF (min^{-1})	$\dot{V}_E$ MAX. (l/min)	AF_{MAX} (min^{-1})	$\dot{V}_{O_2}$ MAX. (l/min)	$HF_{MAX.}$ (min^{-1})	LEISTUNG (MIN'/WATT)	WATT/KG	PWC_{170} (WATT)	SOLL $\dot{V}_{O_2}$/KG (ml/min·kg)	IST $\dot{V}_{O_2}$/KG (ml/min·kg)	IST = % VON SOLL $\dot{V}_{O_2}$
16	23,7	183	75	6,7	11	235	68	95,4	38	3181	193	2' 300	4,0	3,2	47,6	42,4	89,0
17	29,4	177	66	8,4	11	260	77	116,2	47	3197	185	1' 300	4,5	3,6	45,3	48,4	106,8
18	22,8	182	67	8,4	17	245	66	138,4	49	3805	197	1' 300	4,3	2,6	48,0	56,8	118,3
19	23,8	186	86	10,7	13	357	63	145,1	51	3322	184	1' 300	3,5	2,9	47,6	38,6	82,4
20	27,6	177	67	7,1	15	251	86	79,3	34	2863	185	1' 250	3,7	2,9	46,1	38,3	83,0
21	26,8	183	67	9,6	12	264	81	120,1	37	3086	180	0,5'300	4,5	3,6	46,5	46,1	99,2
22	39,2	180	78	9,0	13	354	92	102,0	42	2936	183	2' 250	3,2	2,6	41,4	37,6	90,8
23	21,3	184	76	14,8	20	424	73	115,4	36	3144	181	28 250	3,3	2,6	48,4	41,4	85,5
24	27,9	175	68	8,7	13	257	56	98,5	39	2911	181	0,5'300	4,4	3,5	46,1	42,8	92,9
25	16,1	174	58	11,4	15	329	74	142,5	48	3559	207	2' 300	5,2	3,6	50,4	61,4	121,8
26	19,8	187	76	8,1	14	288	69	133,6	39	4084	192	2' 300	3,9	2,7	49,2	53,8	109,4
27	16,8	188	70	10,4	18	311	88	148,9	64	4324	199	1' 400	5,7	2,9	50,4	61,8	122,7
28	19,7	178	64	12,4	12	322	86	80,0	42	2988	203	0,5'300	4,7	1,7	49,2	46,7	94,0
29	31,4	174	75	7,8	12	310	72	137,8	43	3180	197	0,5'310	4,1	2,3	44,9	42,4	97,0

TABELLE 28: ROHDATEN ATEMMINUTENVOLUMEN BEI FLÜGEN MIT WINDENSTART

PB	HALBMINUTEN 1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	15.4					15.8	14.7	27.7	27.7	26.8	25.3	20.2
2				9.9	8.8	13.0	19.4	22.2	19.1	15.6	14.3	13.6
3	12.5	12.1	10.8	7.5	7.1	6.8	14.7	25.3	20.9	15.2	12.5	12.2
4					21.8	15.4	18.7	37.8	29.5	28.2	27.7	27.3
5	10.1	10.1	11.7	11.7	10.6	10.3	15.2	22.0	23.5	23.3	20.2	
6	12.8	12.8	13.0	10.6	12.3	16.5	15.6	22.2	22.4	21.8	22.2	
7	13.4	14.3	14.1	13.4	16.3	16.9	19.1	28.6	25.1	26.2	24.2	21.3
8	14.5	18.5	16.9	15.8	13.0	16.5	16.1	18.5	17.6	19.8	16.3	21.3
9				18.9	12.3	18.7	21.1	20.7	21.3	23.1	26.6	25.5
10	7.5	10.3	11.2		11.2	10.3	14.7	23.8	27.1	25.7	24.9	22.7
11					13.2	15.6	10.6	17.4	19.8	20.0	18.5	18.7
12							7.5	7.0	9.7	9.8	7.9	8.6
13	6.6	7.3	10.6	11.4	15.0	14.3	18.0	20.5	19.8	18.0	21.1	17.2
14	10.6	10.6	9.0	9.0	16.3	18.5	15.8	22.9	21.5	18.7	15.8	12.4
15	18.7	9.0	10.6	9.5	11.0	10.6	9.9	15.4	17.6	14.3	15.0	14.1
16	18.9				22.0	15.4	16.1	17.4	26.2	25.3	24.2	23.8
17				14.7	14.7	13.9	17.6	20.5	24.0	18.0	14.3	13.9
18	7.7			7.7	10.1	10.3	15.8	15.8	18.5	15.8	14.7	13.9
19				11.9	12.5	18.7	14.7	29.6	24.0	25.3	23.3	24.2
20	8.1				11.9	11.9	8.1	14.5	16.1	14.5	15.2	12.8
21	23.1	27.8	19.8	20.2	19.8	22.2	23.1	29.2	35.3		26.4	
22				11.0	16.3	16.1	11.0	22.7	21.1	19.6	17.6	19.1
23	15.8	20.2	17.8	14.7	19.1	19.6	29.5	31.7	30.8	29.9		
24	9.5		14.7	11.9	9.5	10.1	11.9	12.5	13.2	12.3	15.6	14.5

PB	HALBMINUTEN 13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
1	20.7	20.9	20.0	19.6	139.8	19.8						
2	14.1	11.4	12.8	14.5	20.5	20.5	12.2	5.3				
3	11.9		15.8	18.7	21.8	24.6	17.6	9.0	8.1			
4	24.2	21.9	29.1	27.4	38.5	38.5	16.1	15.6	16.7	12.2		
5			17.2	22.4	22.7	25.1	22.0	10.8	10.3	7.9	7.9	7.9
6			18.9	21.1	21.5	26.0	20.2	12.9	12.6	13.4	15.8	15.4
7			20.0	22.7	26.2	27.7	19.1	16.5	15.0	16.3	17.4	17.4
8	19.8		16.0	18.1	21.5	23.5	11.2	11.4	14.7	14.3		
9	11.1	11.1	25.1	24.6	24.0	29.9	17.8	17.6	15.2	17.8		
10	21.6	16.1	21.8	22.7	24.4	24.4	18.3	14.7	14.1	17.6	14.1	13.9
11	21.1	18.9	18.0	22.7	21.1	21.1	17.2	14.1	15.0			
12	9.6	9.2	7.0	8.1	9.2	10.8						
13	19.1	21.1	18.7	22.0	25.1	27.8						
14	18.1	17.2	20.9	22.9	20.9	28.2	13.6	10.1	10.1			
15	14.4	9.1	12.1	14.7	15.2	16.9	13.6					
16	26.3	24.6	26.0	25.6	28.8	28.2						
17	15.9	14.1	16.5	19.1	24.0	20.8						
18	11.5	11.4	17.6	17.4	18.7	19.4	6.9	6.8	6.9	6.8	6.6	6.6
19	21.9	21.9	24.9	27.1	27.1	20.8	17.4	13.2	9.2	10.3	12.8	12.8
20	14.1	11.2	16.9	17.9	17.9	20.9	10.3	13.6	7.7	8.8	7.1	6.8
21		22.9	25.1	25.1	20.8	20.8						7.9
22	21.1	15.1	16.1	18.7	19.4	21.1	12.6	7.9	10.8			
23			29.9	26.8	31.2	31.7						
24	11.5	11.1	12.3	11.2	12.5	14.1						

TABELLE 29: ROHDATEN ATEMFREQUENZ BEI FLÜGEN MIT WINDENSTART

PE	HALBMINUTEN											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	16.0		16.0			16.0	24.0	26.0	24.0	24.0	24.0	24.0
2	16.0			16.0	18.0	18.0	24.0	26.0	18.0	26.0	26.0	22.0
3	24.0	14.0	19.0	18.0	14.0	20.0	18.0	23.0	26.0	22.0	18.0	20.0
4				26.0	28.0	24.0	24.0	38.0	31.0	33.0	33.0	33.0
5	21.0	17.0	17.0	17.0	20.0	18.0	22.0	30.0	26.0	26.0	26.0	24.0
6	16.0	16.0	18.0	17.0	16.0	18.0	18.0	28.0	26.0	24.0	24.0	23.0
7	18.0	20.0	20.0	19.0	22.0	23.0	25.0	36.0	29.0	24.0	27.0	26.0
8	26.0	21.0	25.0	26.0	26.0	26.0	28.0	32.0	34.0	34.0	34.0	30.0
9				28.0	26.0	29.0	30.0	36.0	32.0	38.0	34.0	36.0
10	18.0				22.0	20.0	24.0	36.0	31.0	32.0	30.0	28.0
11	16.0		16.0		16.0	14.0	16.0	24.0	20.0	18.0	22.0	22.0
12							20.0	18.0	20.0	20.0	18.0	20.0
13	12.0	16.0	14.0	14.0	18.0	16.0	18.0	28.0	21.0	21.0	24.0	24.0
14	20.0			21.0	18.0	16.0	24.0	32.0	28.0	32.0	24.0	26.0
15	18.0	18.0	17.0	12.0	16.0	16.0	16.0	26.0	20.0	20.0	20.0	22.0
16				22.0	22.0	22.0	22.0	34.0	30.0	30.0	32.0	32.0
17	18.0				18.0	20.0	26.0	26.0	24.0	22.0	20.0	22.0
18				18.0	18.0	20.0	20.0	22.0	20.0	22.0	18.0	
19				20.0	21.0	22.0	20.0	38.0	36.0	26.0	32.0	30.0
20	16.0				18.0	18.0	16.0	28.0	24.0	22.0	18.0	22.0
21	21.0	15.0	14.0	20.0	18.0	21.0	24.0	30.0	28.0	27.0		
22	14.0		14.0		14.0	10.0	18.0	11.0	13.0	14.0	10.0	14.0
23	26.0	26.0	24.0	24.0	25.0	27.0	40.0	32.0	32.0	34.0	36.0	32.0
24	18.0		20.0	18.0	16.0	16.0	17.0	18.0	18.0	16.0	18.0	18.0

PE	HALBMINUTEN											
	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
1	24.0		21.0	20.0	26.0	26.0						
2	24.0	22.0	21.0	25.0	30.0	30.0	26.0	16.0				
3	18.0	20.0	20.0	22.0	24.0	24.0	18.0	14.0	18.0			
4	21.0		38.0	29.0	40.0	40.0	18.0	20.0	22.0	19.0		
5			24.0	25.0	31.0	34.0	21.0	21.0	16.0	17.0		16.0
6	22.0		23.0	25.0	28.0	28.0	23.0	18.0	18.0	20.0	20.0	19.0
7	21.0	25.0	28.0	25.0	28.0	28.0	23.0	20.0	20.0	20.0	22.0	19.0
8	32.0	32.0	30.0	30.0	34.0	36.0	28.0	24.0	26.0	26.0	24.0	24.0
9	25.0	23.0	24.0	26.0	24.0	32.0	30.0	26.0	26.0	28.0		
10	23.0	23.0	30.0	28.0	29.0	28.0	24.0	20.0	20.0	20.0	24.0	20.0
11	20.0	20.0	16.0	24.0	24.0	24.0	16.0	18.0	20.0			16.0
12	20.0	22.0	20.0	22.0	22.0	22.0						
13	16.0	25.0	24.0	27.0	42.0	42.0						
14	31.0	23.0	25.0	28.0	28.0	28.0	20.0	24.0				
15	16.0	19.0	20.0	24.0	24.0	24.0						
16	26.0	24.0	36.0	28.0	40.0	40.0						
17	22.0	20.0	22.0	26.0	30.0	28.0	24.0					
18	22.0	22.0	22.0	24.0	28.0	28.0	26.0	16.0	16.0	16.0		16.0
19	31.0	31.0	31.0	28.0	32.0	32.0	28.0	14.0	14.0	19.0	19.0	19.0
20	22.0	22.0	26.0	24.0	24.0	24.0	14.0	16.0	12.0	12.0	14.0	14.0
21	28.0	28.0	28.0	25.0	32.0	32.0						
22	14.0	15.0	17.0	17.0	24.0	28.0	16.0	10.0	12.0		12.0	12.0
23	34.0		30.0	30.0	36.0	36.0						
24	16.0	17.0	18.0	16.0	16.0	18.0						

TABELLE 30: ROHDATEN SAUERSTOFFAUFNAHME BEI FLÜGEN MIT WINDENSTART

PB	HALBMINUTEN											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	431.0						482.0	454.0	753.0	776.0	718.0	708.0
2				317.0	282.0	403.0	580.0	484.0	468.0	435.0	435.0	465.0
3	379.0	367.0	304.0	236.0	226.0	217.0	456.0	579.0	470.0	354.0	400.0	422.0
4					485.0	374.0	447.0	776.0	524.0	489.0	509.0	523.0
5	333.0		386.0	386.0	358.0	358.0	528.0	701.0	779.0	767.0	683.0	
6	388.0	439.0	458.0	388.0	449.0	603.0	570.0	716.0	801.0	758.0	770.0	
7	382.0	408.0	402.0	382.0	465.0	467.0	561.0	723.0	823.0	733.0	645.0	591.0
8	368.0	445.0	429.0	394.0	377.0	471.0	387.0	589.0	538.0	626.0	654.0	631.0
9				353.0	283.0	381.0	421.0	486.0	422.0	439.0	535.0	545.0
10					336.0	218.0	365.0	666.0	560.0	573.0	584.0	590.0
11					311.0	362.0	268.0	449.0	535.0	508.0	453.0	419.0
12							300.0	273.0	398.0	402.0	348.0	366.0
13			322.0	346.0	430.0	410.0	516.0	604.0	552.0	472.0	563.0	527.0
14	304.0	360.0		258.0	426.0	351.0	368.0	461.0	503.0	545.0	436.0	325.0
15	445.0	267.0	341.0	365.0	400.0	389.0	364.0	537.0	599.0	505.0	525.0	475.0
16					441.0	322.0	350.0	346.0	532.0	550.0	537.0	538.0
17					348.0	330.0	519.0	553.0	401.0	325.0	310.0	325.0
18				216.0	255.0	270.0	441.0	387.0	453.0	400.0	384.0	352.0
19				286.0	331.0	394.0	310.0	581.0	576.0	497.0	493.0	522.0
20						339.0	267.0	450.0	499.0	499.0	517.0	435.0
21	382.0	403.0	469.0	401.0	486.0	545.0	863.0	839.0	630.0			
22					392.0	387.0	284.0	585.0	535.0	457.0	327.0	467.0
23	385.0	494.0	443.0	359.0	451.0	455.0	672.0	767.0	728.0	697.0		
24			436.0	348.0	297.0	327.0	373.0	421.0	423.0	450.0	500.0	453.0

PB	HALBMINUTEN											
	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
1	541.0	596.0	577.0	560.0	563.0	571.0						
2	456.0	422.0	410.0	450.0	548.0	555.0	356.0	180.0				
3	341.0		393.0	494.0	567.0	640.0	531.0	287.0	259.0			
4	502.0	502.0	787.0	757.0	643.0	666.0	333.0	348.0	399.0	310.0		
5			586.0	724.0	704.0	783.0	706.0	365.0	358.0	275.0		
6			615.0	677.0	821.0	779.0	734.0	508.0	503.0	471.0	535.0	
7	611.0		611.0	603.0	684.0	691.0	502.0	495.0	435.0	457.0	480.0	370.0
8	498.0	425.0	469.0	572.0	499.0	691.0	388.0	371.0	311.0	452.0	421.0	
9	522.0		587.0	600.0	564.0	635.0	423.0	403.0	323.0	392.0		
10	542.0	531.0	574.0	549.0	641.0	647.0	519.0	412.0	395.0	493.0	395.0	390.0
11	478.0	478.0	392.0	513.0	460.0	463.0	464.0	428.0	418.0			
12	245.0		275.0	268.0	432.0	432.0						
13	606.0	472.0	510.0	555.0	583.0	587.0						
14	554.0	527.0	490.0	521.0	443.0	513.0	110.0	121.0				
15	458.0	319.0	394.0	472.0	495.0	550.0						
16	573.0	536.0	536.0	549.0	617.0	626.0	565.0					
17	340.0	358.0	402.0	451.0	612.0	615.0	367.0					
18	322.0	339.0	493.0	480.0	500.0	502.0	323.0	224.0				
19	504.0		551.0	521.0	589.0	621.0	381.0	317.0	233.0			
20	500.0	462.0	592.0	500.0	449.0	690.0	381.0	490.0	285.0	308.0	248.0	231.0
21			586.0	590.0	718.0	729.0						
22	473.0	426.0	377.0	438.0	462.0	533.0	356.0	213.0	309.0			
23			697.0	726.0	736.0	736.0						
24	382.0	398.0	383.0	428.0	459.0	465.0						

TABELLE 31: ROHDATEN SAUERSTOFFAUFNAHME/KG KÖRPERGEWICHT BEI FLÜGEN MIT WINDENSTART

PB	I	HALBMINUTEN											
	I	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	I	4 3					5.4	5.0	8.4	8.6	8.0	7.9	6.0
2	I				4.5	4.0	5.7	9.7	8.1	6.4	5.9	6.0	6.4
3	I	5.5	5.3	4.4	3.4	3.2	3.1	5.6	8.4	6.8	5.1	5.8	6.1
4	I					6.8	5.3	6.3	10.9	7.4	6.9	7.2	7.4
5	I	5.3		6.1	6.1	5.7	5.7	8.4	11.1	12.4	12.2	10.8	
6	I		6.7	6.9	5.9	6.8	9.1	8.6	11.7	12.1	11.9	11.7	
7	I	5 8	6.2	6.1	5.8	7.0	7.1	8.5	11.0	12.5	11.1	9.8	9.0
8	I	5 0	6.1	5.9	5.4	5.2	6.5	5.3	8.1	7.4	8.6	9.0	8.7
9	I				5.1	3.5	5.5	6.1	5.8	6.1	6.4	7.8	7.9
10	I					4.8	3.9	5.5	8.1	8.5	8.4	8.6	9.0
11	I					4.9	5.7	4.3	7.1	8.5	8.1	7.2	6.7
12	I							4.3	3.9	5.7	5.7	5.0	5.2
13	I	4.9		5.1	5.5	6.8	6.5	8.2	9.7	8.8	7.5	8.9	8.4
14	I	4 4			3.6	5.9	4.9	4.3	5.3	5.7	6.2	5.0	3.8
15	I	5.4	3.3	4.2	4.5	4.9	4.7	4.4	6.5	7.3	6.2	6.4	5.8
16	I					6.0	4.4	4.7	4.7	7.2	7.4	7.3	7.3
17	I					5.3	5.0	7.9	8.4	6.1	4.9	4.7	4.9
18	I				3.2	4.5	4.8	6.6	5.8	6.7	6.0	5.7	5.3
19	I				3.4	4.0	5.6	4.4	8.6	6.9	7.3	7.2	7.6
20	I						5.1	4.0	6.7	7.4	7.1	7.7	6.5
21	I	5.7	6.0	7.0	6.0	7.3	8.1	12.9	12.5	9.4			
22	I					5.0	5.0	3.7	7.5	6.9	5.9	4.2	6.0
23	I	6.4	6.7	6.4	5.1	6.1	6.1	9.1	10.4	9.8	9.4		
24	I			6.4	5.1	4.4	4.8	5.5	6.2	6.2	6.6	7.4	6.7

PB	I	HALBMINUTEN											
	I	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
1	I	6.6		6.4	6.2	6.2	6.2						
2	I	4.2	5.8	5.7	6.2	9.1	9.3	5.9	3.0				
3	I	6.5		6.9	7.2	8.2	9.2	7.7	4.2	3.8			
4	I	7.2	10.4	11.8	10.7	9.1	9.4	4.6	4.9	5.6	4.4		
5	I			9.2	11.5	11.2	12.4	11.2	5.8	5.7	4.4		
6	I			9.8	10.8	12.4	13.7	11.1	7.7	7.6	7.1	8.1	
7	I	6.2		9.2	9.1	10.4	10.5	7.6	7.5	6.6	6.9	7.2	5.6
8	I	6.6	5.8	7.1	7.5	8.4	8.5	5.8	5.1				
9	I	6.6		10.1	8.7	6.9	9.2	6.1	5.8	4.7	5.7		
10	I	6.8	7.8	10.0	8.6	8.4	9.5	7.6	6.1	5.8	7.3	5.8	5.7
11	I	7.6	8.4	6.2	8.1	7.7	7.2	7.4	6.2	6.6			
12	I	6.6		8.9	6.1	6.2	6.5						
13	I	6.6	7.5	9.7	8.8	8.1	8.1						
14	I	6.2	6.0	6.8	7.2	6.1	8.2	4.3	4.5				
15	I	6.6	11.9	5.8	6.0	6.7							
16	I	7.7	7.2	7.2	7.4	6.2	8.5	7.6					
17	I	6.2	5.4	6.1	6.8	8.2	9.2	5.6					
18	I	4.8	5.1	7.4	7.2	7.5	7.5	7.8	3.1				
19	I	7.3		7.9	7.5	8.5	8.9	5.4	4.5				
20	I	7.5	6.9	8.8	7.5	6.7	10.1	5.7	7.2	3.3			
21	I			8.7	8.8	10.7	10.9			4.3	4.6	7.7	7.4
22	I	6.1	5.5	4.8	5.6	5.9	6.8	4.6	2.7	4.0			
23	I			9.8	10.7	11.3	11.1						
24	I	5.6	5.9	5.6	6.1	6.8	6.8						

TABELLE 32: ROHDATEN HERZFREQUENZ BEI FLÜGEN MIT WINDENSTART

PB	HALBMINUTEN 1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	122.0	119.0	117.0	114.0	136.0	136.0	141.0	156.0	161.0	163.0	169.0	167.0
2			121.0	121.0	110.0	124.0	133.0	149.0	160.0	150.0	138.0	138.0
3	115.0	106.0	101.0	99.0	98.0	113.0	118.0	136.0	123.0	115.0	120.0	111.0
4					115.0	121.0	122.0	143.0	141.0	139.0	140.0	141.0
5	100.0	102.0	104.0	111.0	103.0	98.0	107.0	133.0	127.0	128.0	127.0	118.0
6			84.0	84.0	89.0	104.0	115.0	129.0	124.0	119.0		
7	94.0	97.0	102.0	97.0	106.0	115.0	110.0	136.0	138.0	126.0	119.0	116.0
8	97.0	94.0	98.0	100.0	103.0	104.0	116.0	128.0	112.0	96.0	98.0	110.0
9	89.0	90.0		95.0	101.0	96.0	104.0	108.0	114.0	115.0	112.0	118.0
10						107.0	145.0	150.0	144.0	139.0	136.0	134.0
11	78.0				90.0	90.0	90.0	100.0	102.0	87.0	88.0	93.0
12						77.0	77.0	104.0	97.0	82.0	84.0	81.0
13	79.0	83.0	84.0	94.0	104.0	108.0	107.0	123.0	118.0	107.0	114.0	126.0
14						84.0	90.0	100.0	99.0	85.0	74.0	73.0
15	97.0	96.0	97.0	96.0	98.0	96.0	102.0	118.0	115.0	109.0	98.0	108.0
16	109.0			116.0	119.0	114.0	112.0	117.0	125.0	120.0	119.0	124.0
17				109.0	96.0	113.0	117.0	121.0	121.0	116.0	114.0	110.0
18				88.0	92.0	104.0	117.0	134.0	127.0	106.0	107.0	123.0
19	83.0	83.0	83.0	83.0	95.0	105.0	90.0	111.0	112.0	107.0	106.0	104.0
20	88.0		89.0			94.0	105.0	146.0	124.0	113.0	112.0	100.0
21	122.0	117.0	118.0	117.0	119.0	113.0	120.0	153.0	161.0	150.0	143.0	153.0
22				84.0	88.0	104.0	117.0	135.0	146.0	132.0	124.0	125.0
23	106.0	112.0	113.0	111.0	116.0	121.0	136.0	142.0	140.0	127.0	121.0	126.0
24	105.0	107.0	107.0	110.0	104.0	98.0	95.0	126.0	119.0	114.0	113.0	115.0

PB	HALBMINUTEN 13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
1	165.0		160.0	161.0	158.0	160.0	148.0	138.0				
2	139.0	138.0	130.0	134.0	137.0	139.0	132.0	113.0	112.0			
3	117.0	128.0	133.0	131.0	139.0	133.0	118.0	98.0	91.0			
4	137.0	138.0	160.0	162.0	161.0	156.0	148.0	138.0	131.0	129.0	129.0	128.0
5			127.0	129.0	137.0	135.0	121.0	100.0	97.0	95.0		
6			123.0	131.0	135.0	135.0	116.0	92.0	97.0	85.0	89.0	94.0
7	116.0	119.0	124.0	139.0	135.0	132.0						
8	101.0	104.0	113.0	110.0	118.0	117.0	107.0	92.0	98.0	100.0	99.0	
9	118.0		118.0	112.0	112.0	117.0	114.0	114.0	101.0	99.0	97.0	97.0
10	146.0	143.0	131.0	134.0	148.0	150.0	110.0	105.0	100.0	99.0	95.0	90.0
11	110.0	118.0	106.0	112.0	124.0	123.0	109.0	79.0	84.0	88.0	84.0	79.0
12	76.0	87.0	87.0	89.0	91.0	94.0						
13	123.0	125.0	125.0	134.0	160.0	159.0	135.0					
14	84.0	85.0	98.0	96.0	88.0	89.0	74.0	68.0				
15	106.0	104.0	112.0	118.0	121.0	120.0						
16	122.0	126.0	134.0	131.0	134.0	137.0	137.0	118.0	110.0			
17	113.0	112.0	126.0	127.0	138.0	142.0	123.0	116.0	110.0			
18	106.0	108.0	136.0	131.0	144.0	146.0	123.0	116.0	110.0			
19	113.0		117.0	122.0	125.0	125.0	106.0					
20	98.0	104.0	105.0	113.0	136.0	161.0	145.0					
21	154.0	150.0	146.0	143.0	160.0	161.0	147.0	128.0				
22	134.0	121.0	127.0	136.0	136.0	143.0	125.0	120.0	104.0	98.0	101.0	88.0
23	127.0		122.0	142.0	145.0	148.0	135.0	121.0	112.0	108.0	107.0	
24	118.0	119.0	124.0	126.0	130.0	133.0	132.0	108.0				

TABELLE 33: ROHDATEN VON ATEMMINUTENVOLUMEN, ATEMFREQUENZ, SAUERSTOFFAUFNAHME UND HERZFREQUENZ DER FÜNF PILOTEN (VP 25 BIS 29), DIE FLÜGE MIT FLUGZEUG-SCHLEPPSTART ABSOLVIERTEN.

	VP	HALBMINUTEN																							
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
$\dot{V}_E$ (l/min)	25	15,6	17,8	19,1	16,9	15,8	17,4	17,8	22,0	25,1	22,0	17,6	21,6	17,8	17,2	18,7	17,4	26,2	26,2						
	26	16,7			16,5	23,5	20,0	19,1	34,3	33,2	31,2	28,4	32,3	26,0	28,4	25,3	32,8	36,7	36,2	24,9	21,1	15,7			
	27	21,6	18,0	21,1	20,5	17,8	23,3	24,2	23,8	20,5	22,7	22,2	27,3	22,2	18,9	19,8	22,7	24,6	25,5	19,6	14,1	15,2	11,9	12,8	10,6
	28							14,5	19,1	22,0	20,5	20,9	21,1	18,0	18,9	19,1	21,6	21,6	24,9	11,9	13,6	9,5	8,8		
	29			16,1	19,4	21,6	20,9	15,2	24,6	21,8	22,0	20,7	19,8	19,8	16,5	24,4	19,6	25,5	25,5	17,4	13,0	11,9	16,5	14,7	12,5
AF (min^{-1})	25	23	24	28	26	24	26	26	31	31	28	26	28	26	26	28	28	28	28						
	26	20			18	22	28	28	46	34	36	36	36	32	32	32	36	38	38	24	20	16			
	27	28	22	24	24	24	34	29	27	24	28	26	30	26	26	26	28	28	32	21	16	18	16	18	14
	28						24	32	38	38	40	38	36	34	34	37	37	40	40	20	22	24	22		
	29			18	24	22	28	24	28	22	26	21	23	20	18	24	20	28	28	21	21	20	14	16	16
$\dot{V}_{O_2}$ (ml/min)	25	316	330	337	313	307	369	377	468	579	498	401	455	383	370	408	352	357	532						
	26	307			272	441	376	430	601	683	631	501	522	465	495	421	512	542	546	435	396	450			
	27	485	457	536	538	452	554	677	709	683	722	716	759	670	562	601	680	747	769						
	28							394	544	612	591	612	584	475	483	578	514	609	773	385	429	299	277		
	29			387	424	452	485	353	604	539	563	526	455	471	408	572	468	587	592	435	330	312	397	360	296
HF (min^{-1})	25	99	106	113	111	112	104	117	116	135	133	131	129	124	122	126	130	125	120	102	95	104			
	26	92			113	111	120	135	151	153	141	131	130	129	123	137	163	156	144	127	108	104	100		
	27	92	90	96	88	88	109	122	110	100	110	105	110	103	107	106	114	120	121	102	83	83	80	79	76
	28					131	134	136	138	138	136	139	141	136	136	145	149	145	139	125	114	113	122		
	29		101	108	97	99	109	104	110	107	108	108	113	110	101	117	117	123	125	106	94	92	95	92	91

TABELLE 34: ROHDATEN IN-/EXSPIRATORISCHE SAUERSTOFFDIFFERENZ BEI FLÜGEN MIT WINDENSTART (VP 1 BIS 24) BZW. MIT FLUGZEUGSCHLEPPSTART (VP 25 BIS 29; TAB. 35).

$F_{iO_2} - F_{eO_2}$ (%)

VP	HALBMINUTEN																							
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
1	3,4					3,6	3,6	3,4	3,5	3,3	3,4	3,4	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5						
2			3,2	3,2	3,2	3,1	3,1	3,1	3,1	3,1	3,2	3,3	3,4	3,3	3,3	3,3	3,2	3,3	3,2	3,4				
3	3,6	3,6	3,4	3,2	3,1	3,2	3,1	2,9	2,6	2,7	3,2	3,2	3,1	3,2	3,1	3,3	3,1	3,2	3,6	3,8	3,8			
4				2,9	2,8	3,0	3,0	2,6	2,3	2,2	2,3	2,4	2,6	2,9										
5	3,8	3,7	3,7	3,7	3,8	3,9	3,9	3,6	3,8	3,8	3,8				3,8	3,7	3,5	3,6	3,7	3,8	3,9	3,9		
6		3,9	3,9	4,0	4,0	4,0	4,0	3,7	4,0	3,9	3,8	3,7	3,7		3,7	3,7	3,7	3,6	4,1	4,1	4,2	4,0	3,8	4,0
7	3,2	3,2	3,2	3,2	3,2	3,1	3,3	3,3	3,5	3,3	3,5	3,4	3,4		3,4	3,0	3,0	2,8	3,0	3,4	3,3	3,2	3,1	3,1
8	2,9	2,7	2,8	2,8	3,0	3,2	3,1	3,2	3,4	3,4	3,4				3,3	3,2	3,2	3,1	3,4	3,6	3,3	3,5	3,4	
9				2,3	2,3	2,4	2,4	2,4	2,4	2,3	2,4	2,5	2,6	2,5	2,5	2,6	2,4	2,5	2,8	2,7	2,8	2,6		
10					3,2	3,2	3,2	2,9	2,7	2,9	2,9	3,2	3,3	3,3	3,4	3,3	3,3	3,2	3,1	3,2	3,2	3,3	3,4	3,4
11				2,8	2,8	2,8	3,0	3,2	3,3	3,1	3,0	2,7	2,7	2,7	2,6	2,7	2,7	2,6	3,2	3,6	3,3			
12						3,9	4,0	3,9	4,1	4,1	4,4	4,3	4,3	4,3	3,8	3,8	4,0	4,0						
13	3,6	3,6	3,6	3,6	3,5	3,7	3,7	3,6	3,4	3,2	3,4	3,4	3,5	3,5	3,2	3,1	2,7	2,6						
14	3,4			3,4	3,1	2,5	2,5	2,4		3,0	3,0	2,8	3,1	3,2	2,9	2,8	2,6	2,6	2,9	3,0				
15	4,1	4,2	4,3	4,5	4,4	4,4	4,6	4,3	4,2	4,4	4,3	4,1	4,0	4,0	4,0	3,9	3,8	3,9						

FORTSETZUNG SIEHE TAB. 35

TABELLE 35: ROHDATEN IN-/EXSPIRATORISCHE SAUERSTOFFDIFFERENZ BEI FLÜGEN MIT WINDENSTART (VP 1 BIS 24) BZW. MIT FLUGZEUGSCHLEPPSTART (VP 25 BIS 29). (FORTSETZUNG VON TAB. 34)

$F_{iO_2}-F_{eO_2}$ (%)

VP	HALBMINUTEN																							
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
16					2,4	2,5	2,6	2,5	2,5	2,6	2,7	2,8	2,7	2,7	2,6	2,6	2,6	2,5						
17				3,0	3,0	3,0	3,0	3,2	3,0	2,9	3,0	2,9	3,0	3,1	3,0	3,0	3,0	2,9	3,2	3,2				
18				2,9	3,0	3,1	3,1	3,0	3,0	3,1	3,2	3,0	3,1	3,1	3,3	3,4	3,3	3,2	3,2	3,3				
19				2,4	2,7	2,5	2,4	2,4	2,4	2,6	2,6	2,7	2,7		2,7	2,7	2,6	2,4	2,6	2,9	3,0	3,3		
20				2,9	2,9	2,9	3,1	3,2	3,4	3,4	3,4	3,4	3,5	3,5	3,5	3,6	3,4	3,4	3,7	3,7	3,7	3,6	3,5	3,4
21	2,3	2,0	2,3	2,4	2,3	2,4	2,3	2,9		2,9				2,8	2,8	2,8	2,8	2,8						
22					2,9	2,9	3,1	3,5	3,1	2,9	2,9	3,0	2,8	2,8	2,8	2,8	2,9	3,0	3,1	3,2	3,4			
23	2,9	2,9	3,2	3,2	3,2		3,5	3,0	2,9						3,0	3,1	3,3	3,5	3,2	3,4				
24			3,6	3,5	3,8	3,8	3,8	4,1	4,0	4,0	3,9	3,8	3,9	4,0	4,0	4,2	4,2	4,0						
25	2,3	2,2	2,0	2,1	2,2	2,4	2,4	2,6	2,7	2,6	2,7	2,6	2,5	2,5	2,3	2,3	2,4	2,4						
26	2,2			2,2	2,2	2,3	2,3	2,1	2,4	2,4	2,1	1,9	2,1	2,1	1,9	2,0	1,8	1,6	2,2	2,2	2,0			
27	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,2	3,5	3,8	3,8	3,8	3,7	3,6	3,6	3,5	3,5	3,5	3,5	3,8	4,0	3,7	3,8	3,8	
28							3,1	3,3	3,3	3,4	3,4	3,3	3,1	3,0	3,0	3,1	3,2	3,5	3,7	3,6	3,6	3,6		
29	2,8	2,8	2,6	2,6	2,7	2,7	2,7	2,8	3,0	3,0	3,0	2,7	2,8	2,9	2,9	2,7	2,7	2,7	2,7	2,9	3,0	2,9	2,8	2,7

An dieser Stelle sei den Mitgliedern der AKAFLIEG Tübingen, der Luftsportgruppe Ravensburg-Weingarten und des Flugsportvereins Unterjesingen für ihre Teilnahme als Versuchspersonen gedankt.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Uli Baudermann (Tübingen) für die Entwicklung des Meßwert-Registriersystems und für seine Mithilfe beim Lösen technischer Probleme.

LEBENSLAUF

Johannes Ernst Beier

- geboren am 27. Februar 1948 in Netzschkau/DDR
- Eltern: Ernst Beier, Schlosser, und seine Frau Gertrud Beier, geb. Ledwig

- von 1953 bis 1967 Schulbesuch in Netzschkau/DDR und Köln, Abitur 1967 im Städt. Neusprachlichen Gymnasium Köln-Deutz;

- von 1967 bis 1973 Studium der Humanmedizin an der Universität Köln; während dieser Zeit Tätigkeit als studentische Hilfskraft im Institut für Kreislaufforschung und Sportmedizin der Deutschen Sporthochschule Köln (2,5 Jahre);
- Medizinisches Staatsexamen am 14. November 1973;
- Medizinalassistentenzeit im Bodensee-Kreiskrankenhaus Tettnang/Bodensee von April 1974 bis März 1975;

- anschließend Ableisten des Grundwehrdienstes und einer dreimonatigen Anschlußwehrübung; Ausbildung zum Fliegerarzt und Tätigkeit als Truppen-und Fliegerarzt;
- von Dezember 1976 bis September 1977 Assistenzarzt der Chirurgischen Abteilung des Stadtkrankenhauses Kempten/Allgäu;
- von Oktober 1977 bis August 1978 Weiterführung der Fliegerarztausbildung und -tätigkeit bei der Bundeswehr;
- von Oktober 1978 bis Oktober 1979 Tätigkeit als Wissenschaftlicher Angestellter im Zentrum Innere Medizin, Abteilung Sportmedizin der Eberhard-Karls-Universität Tübingen;
- Zuerkennung der Zusatzbezeichnung "Sportmedizin" im Juni 1980;

- seit Oktober 1979 tätig als Wissenschaftlicher Mitarbeiter im Institut für Flugmedizin der Deutschen Forschungs- und Versuchsanstalt für Luft- und Raumfahrt e.V. (DFVLR), Bad Godesberg und Köln-Porz.

  Derzeitige Tätigkeitsschwerpunkte sind
  - Untersuchung zentraler und peripherer Kreislaufvorgänge bei wechselnder Schwerkraft (Adaptationsmechanismen bei Schwerelosigkeit und Readaptation an Schwerkraft);
  - Untersuchung antiorthostatisch wirksamer Maßnahmen mit Relevanz für die bemannte Raumfahrt;
  - Bearbeitung vestibularer Probleme in der Raumfahrt;
  - Betreuung und Gesundheitsüberwachung der europäischen Wissenschaftsastronauten (SPACELAB) als 2. Mannschaftsarzt;
  - Mitarbeit in der Fliegerärztlichen Untersuchungsstelle des Instituts.